

Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest

Crues remarquables de rivières sud-brésiliennes et uruguayennes

Maurice Pardé

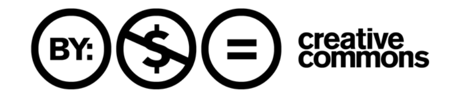
Résumé
Dans une grande partie du Brésil tropical, tout au moins au Sud pour les domaines du Saô Francisco, du Paraïba do Sul, du Rio Grande etc, les crues des grandes rivières, guère possibles en temps de pleine saison chaude, sont relativement modérées, faute d'averses puissantes étendues à plusieurs dizaines de milliers de km2 et parce que les terrains de décomposition superficielle, très épais, ont un pouvoir absorbant efficace. Les gonflements fluviaux deviennent au contraire très puissants plus au Sud dans le Brésil subtropical (Iguazu et Guaiba) ; puis dans l'Uruguay pour le fleuve de ce nom et ses affluents dont le Rio Negro. Ces phénomènes ont lieu en toute saison, et surtout au printemps ou encore plus en automne. En mai 1941, l'Uruguay a débité 30 000 m3 à Federación pour 227 000 km- et le Guaiba à Porto Alegre 25 000 pour 82 000 km3. En avril 1959, l'Uruguay a roulé 35 000 m3 au même lieu et le Rio Negro 15 400 m3 pouri 39 200 km2 au barrage de Rincón del Bonete. Crues causées par des pluies totales moyennes très supérieures à celles qui peuvent, en Europe, arroser de telles étendues durant un mois et surtout durant 10 à 15 jours.

Citer ce document / Cite this document :

Pardé Maurice. Crues remarquables de rivières sud-brésiliennes et uruguayennes. In: Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest, tome 33, fascicule 1, 1962. pp. 5-47;

doi : https://doi.org/10.3406/rgpso.1962.4533

https://www.persee.fr/doc/rgpso_0035-3221_1962_num_33_1_4533



CRUES REMARQUABLES DE RIVIÈRES SUD-BRÉSILIENNES ET URUGUAYENNES

par M. PARDÉ

On donnera ci-dessous quelques renseignements et commentaires sur deux crues très impressionnantes arrivées l'une dans le bassin du Guaiba (Rio Grande do Sul) en avril-mai 1941, et l'autre dans le domaine du Rio Negro de l'Uruguay en avril 1959. Au reste en ces deux circonstances les rivières voisines subtropicales et notamment l'Uruguay ont subi des gonflements très amples sur de vastes extensions.

I. Crues relativement modérées dans le Brésil tropical austral

1. **Rivières tropicales examinées pour comparaison.** — Pour mieux faire ressortir par contraste la grandeur des chiffres que nous présenterons sur les susdits phénomènes, on caractérisera d'abord très brièvement les crues réellement point excessives qui affectent le Brésil tropical.

L'antithèse que notre texte veut poser en principe initial a été fort heureusement mise en lumière dans une remarquable thèse secondaire pour le Doctorat d'Etat, intitulée : *Rapports entre la pluviosité et l'écoulement dans le Brésil subtropical et le Brésil tropical atlantique* (1). L'auteur est un jeune géographe devenu très vite un maître, M. Michel Rochefort, maintenant Professeur à l'Université de Strasbourg. Son examen approfondi et sagace concerne d'une part le Rio Paraiba do Sul qui coule en arrière de Rio de Janeiro et qui est un modèle de régime tropical, et de l'autre certaines rivières du Rio Grande do Sul, à savoir l'Ibirapuita, organisme fluvial peu redoutable, puis le Jacui, le Taquari et le Guaiba. Ces rivières ne

(1) Paris, Institut des Hautes Etudes de l'Amérique Latine, Gr. in-8, 19×27 cm, 279 p. 68 figures. Cette thèse a été présentée à l'Institut de Géographie de la Faculté des Lettres de Strasbourg.

nous étaient pas inconnues (2). Nous avions précédemment ressenti un vif intérêt pour leur crue de mai 1941 et obtenu sur elles comme sur le Paraiba, le Rio Grande, etc, une documentation (3). Nous ajouterons aux conclusions énoncées par M. Rochefort quelques remarques personnelles.

2. **Appréciations numériques sur la gravité relative des crues.** — Nous commencerons donc par mettre en évidence la modération relative des crues tropicales brésiliennes. Ce jugement concerne non seulement le Paraiba do Sul, mais aussi plus au Nord le Rio Sao Francisco (4) puis à l'intérieur vers l'Ouest le Rio Paranahyba et le Rio Grande, branches constituantes du Parana, le Paraguay et au Sud le Tiete et le Paranapanema affluents du Parana moyen, et enfin beaucoup d'autres rivières brésiliennes.

Mais pour apprécier les débits maxima sans recourir pour chaque exemple à des comparaisons entre rivières drainant des surfaces réceptrices analogues, nous emploierons un certain coefficient qui nous évite des embarras aisément définissables.

Tout d'abord il est à peine utile de rappeler que l'on ne doit point classer les puissances respectives des crues d'après leurs seuls débits maxima bruts en m³/s. Car même des intumescences fluviales relativement assez faibles, peuvent avoir de gros débits bruts si elles émanent de bassins très vastes. Personne n'aura l'idée de juger les maxima records de l'Ardèche plus médiocres que ceux du Niger à Koulikoro, bien que le record de l'Ardèche ne semble point ou guère dépasser 6 000 m³ (on croyait à 7 500 naguère) contre 11 000 pour le Niger. Mais ces chiffres s'appliquent respectivement à 2 240 ou même à 1 950 km² (stations de Saint-Martin et de Vallon pour l'Ardèche) et à 120 000 km² pour le Niger.

D'autre part on se tromperait beaucoup moins, mais de façon encore grave en comparant les débits maxima des crues d'après leurs seules valeurs spécifiques, par km² de bassin. En effet, l'expérience révèle, avec une netteté éclatante, le phénomène suivant. Examinons en n'importe quelle partie du monde les débits maxima spécifiques des crues les plus fortes connues, ou de même fréquence. Ces chiffres

---

(2) M. Pardé, *Sur le régime des cours d'eau argentins, uruguayens, paraguayens, sud-brésiliens*. Estudios Geograficos, Ano XIII, num. 49, novembre 1952, pp. 619-648, 7 fig.; Id., *Quelques aperçus relatifs à l'hydrologie brésilienne*, édité par la Houille Blanche à l'occasion du 18ᵉ Congrès International de Géographie (Rio de Janeiro, août 1956), Grenoble 1956, 29×22 cm, 51 p., 17 fig.

(3) Celle-ci nous a été fort obligeamment fournie par la *Divisao de Aguas* de Rio de Janeiro, par sa subdivision de Porto Alegre, puis par le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique de la SOGREAH.

(4) Nous jugeons probable ou tout au moins possible qu'une modération de même genre caractérise les affluents méridionaux de l'Amazone

diminuent très largement, à partir des cours supérieurs les plus violemment arrosés, vers l'aval, à mesure que les bassins augmentent en superficie. Par exemple lors des crues-records, en Europe occidentale ou centrale non méditerranéenne, on aura jusqu'à 2 000 et 2 500 l/s/km² pour 100 km² et seulement 120 à 150 pour 80 000 ou 100 000 km², etc.

Cette dégradation apparente est facilement compréhensible. Elle a pour cause d'abord la diminution des lames d'eau pluviales depuis les parties les plus arrosées vers l'extérieur. Puis plus un cours s'allonge, plus la durée des crues tend à s'étaler par rapport à celle des pluies responsables. Vers les sources, les débits maxima pourront reproduire presque exactement les débits pluviaux d'une certaine durée; plus loin ils en représenteront seulement 80, puis 50 et 30 %, alors que les apports atmosphériques eux-mêmes se réduiront.

Quelque peu gênés par ce genre de décroissances, les hydrologues ont essayé de recourir à certaines valeurs simples qui qualifieraient, par des coefficients grossièrement identiques pour n'importe quelles surfaces réceptrices, les crues assez analogues par leurs degrés relatifs de violence, ou de rareté prise comme le critère de la gravité. Pour ces représentations, on a élaboré diverses formules.

Nous employons fréquemment lorsque nous voulons chiffrer les ordres de grandeur des crues, le coefficient $A=Q/\sqrt{s}$ de Myer ou de Coutagne. Q est le débit maximum brut en mètres cubes seconde et S la surface réceptrice en km². Ce coefficient, qui varie beaucoup selon les régions, est loin de correspondre de manière parfaitement satisfaisante aux réalités géophysiques pour toutes les rivières à l'issue de n'importe quelle surface réceptrice (5), même si on limite l'examen à des bassins qui ne dépassent pas certaines limites : 20 000 ou 100 000 km² par exemple. Pour que A exprime les crues de même gravité relative, à l'aval comme à l'amont, il faudrait qu'on le change d'une station à l'autre. Ou pour le conserver tel quel sur tout le parcours on devrait modifier les exposants de S.

Pourtant, sous ces réserves, les valeurs régionales des coefficients A entre certains ordres de grandeur pour les surfaces réceptrices caractérisent les puissances relatives des crues avec beaucoup plus de stabilité que ne le font les débits spécifiques eux-mêmes. Et par exemple, pour des bassins respectifs de 1 000 à 50 000 km², la valeur

(5) Pour les très petits bassins (moins de 50 et de 20 km²), les plus arrosés lors de crues monstrueuses et pour moins de 500 ou de 1 000 km² lors de phénomènes moins intenses les valeurs de A deviennent sensiblement trop faibles par rapport à celles que l'on obtient, pour des surfaces réceptrices nettement supérieures. Dans ces cas $A'=Q/S^{2/3}$ présente des valeurs moins différentes entre elles pour des crues de mêmes gravités relatives.

de A, en fonction des maxima records, sera comprise entre 40 et 50, alors que le débit spécifique passera de 1 500 l/s/km² pour 1 000 km² à 150 ou 200 pour 5 000. D'où la valeur pratique du coefficient A malgré ses graves imperfections.

3. **Maxima tropicaux relativement modérés.** — Or, dans le Brésil tropical, pour le Paraiba do Sul inférieur à Campos, la plus grande crue survenue à l'issue de 56 322 km² implique seulement 21,5 pour A. Sur le Rio Grande inférieur, le maximum connu de 11 179 m³ en 1929, à Porto Jose Americo (118 554 km²) signifie, pour le coefficient A, 35,4. Pour 700 000 km² du Parana aux chutes de Guayra, on aurait 35,8 à 41,8. En Europe non méditerranéenne, nous trouvons pour les bassins petits et moyens, des chiffres comparables ou sensiblement plus élevés. Par exemple pour 51 500 km² de la Garonne, A record vaut 30,8 à 35,2. Pour 95 000 km² du Rhône, 35,6 à 38,8; pour 42 000 km² du Pô, 62 à Piacenza; pour 91 700 km² du Douro, 43 à 49.

Ou encore, pour 10 000 km² dans le Brésil tropical, entre Rio et le Parana, il n'est pas certain que le coefficient A des plus grandes crues dépasse en beaucoup de points 25 ou 30, alors que l'on relève pour la Garonne à Toulouse lors d'une catastrophe mémorable (juin 1875) 70 à 75; pour le Tarn à Montauban et à Moissac en mars 1930, au moins 60; pour la Dordogne à Bergerac au moins 38; pour la Durance à Mirabeau au moins 45. Et nous n'invoquons point ici les crues cévenoles qui pour quelques centaines de km² peuvent impliquer des coefficients A supérieurs à 120 (au moins 136 pour l'Ardèche à Vallon).

Cette modération des crues tropicales dans la région brésilienne compte parmi ses causes le pouvoir considérable de rétention que possède le sol. Cela tient à une grande épaisseur des terrains de décomposition très poreux qui recouvrent les roches en place cristallines ou gréseuses dans une partie considérable des territoires en question. Une conséquence très importante et quasi paradoxale pour des non-initiés est l'abondance remarquable, malgré les sécheresses régulières de l'hiver, que présentent en étiage même les minima les plus faibles; presque partout plus de 4 à 5 l/s/km², 4,5 pour le Paraiba inférieur à Campos, autant ou pas beaucoup moins pour le Rio Grande comme pour ses tributaires et même pour 810 000 km² du Parana à Posadas. Cette richesse des étiages tropicaux brésiliens est tout à fait contraire à la pauvreté ou à la misère de maintes pénuries fluviales africaines. Elle rend les cours d'eau brésiliens en question assez comparables pour leurs débits les moins bien alimentés aux rivières nivales alpestres.

Les infiltrations surabondantes qui constituent les réserves souterraines dont nous venons de voir les effets pour les étiages, s'opèrent bien entendu aux dépens des crues, à moins de saturations complètes probablement peu réalisables dans les bassins ici considérés. En outre les crues tropicales brésiliennes sont presque aussi sûrement modérées par un autre facteur. C'est l'incapacité, pour le climat en cette région, de permettre des averses extensives véritablement très fortes et par exemple comparables à celles qui pour 10 000 à 100 000 km² engendrent, dans l'Inde, des gonflements fluviaux dont les coefficients A dépassent 100 ou 120.

Nous croyons devoir insister, à cet égard, sur l'erreur que même de bons géographes commettent en s'imaginant que les climats tropicaux témoignent partout d'une très grande violence en ce qui concerne les précipitations et les inondations. C'est exact en certaines régions, surtout dans celles qui sont exposées aux cyclones tropicaux ou à certaines perturbations moins spectaculaires et cependant très redoutables. C'est en grande partie faux pour maintes régions tropicales de l'Amérique du Sud, tout au moins dans l'hémisphère méridional (6) et encore plus pour l'Afrique Noire intertropicale (7). Et M. Rochefort a remarquablement fait ressortir le manque d'identité pluviale et hydrologique pour les étiages et les crues dans les diverses contrées inter-tropicales.

II. Crues très puissantes dans le Brésil subtropical

1. Immodération subtropicale des régimes pluviaux malgré le bon équilibre des moyennes pluviales saisonnières. — Au Sud de la région tropicale où le Sao Francisco, le Paraiba do Sul et le Rio Grande présentent excellemment une hydrologie fluviale relativement pondérée, les écarts saisonniers moyens des débits deviennent plus forts. Et surtout l'immodération se fait remarquable et même excessive en ce qui concerne les extrêmes possibles : étiages et crues.

Cette réalité dont nous allons fournir maintes preuves coïncide

---

(6) Dans certaines régions tropicales boréales de l'Amérique du Sud, et jusque vers l'équateur en Colombie, au Vénézuela et en Guyane, les averses extensives ou limitées, et les crues sont peut-être susceptibles d'offrir bien plus de violence. Le Bocono, sous-affluent de l'Orénoque, aurait débité 5 220 m³ pour 1 600 km², soit A = 131. Le Caroni, tributaire méridional de l'Orénoque, semble pouvoir rouler 20 000 à 25 000 m³ pour environ 80 000 m², soit 70 à 88 pour A. En Amérique centrale, les crues paraissent pouvoir être formidables.

(7) Cf. M. Pardé, *Quelques aspects saillants et nouveaux de l'hydrologie de la France d'Outre-Mer*, La Houille Blanche, mars-avril 1957, pp. 158-180, 15 figures; Id., *La puissance des crues dans l'Afrique Noire et dans d'autres régions intertropicales*. Acad. royale des Sciences coloniales. Bull. des Séances, Bruxelles, 1958, fasc. IV, pp. 1042-1068.

de manière assez paradoxale pour les non initiés avec une transformation quasi totale de sens inverse en ce qui concerne les répartitions pluviales saisonnières d'après les moyennes. Celles-ci, très contrastées dans le domaine tropical, deviennent fort bien équilibrées sous l'empire de ce que nous pouvons appeler le climat subtropical. Selon notre conception, celui-ci se caractérise par des températures moyennes annuelles encore élevées (15 à 20° C) et par des chutes d'eau qui ne sont très médiocres en aucun mois. Le climat tropical-type, répétons-le, veut une écrasante supériorité des précipitations estivales sur celles de l'hiver. Le climat subtropical ici envisagé règne au Sud du Brésil dans les Etats de Parana et de Santa Catarina, de Rio Grande do Sul, puis plus bas en latitude dans l'Uruguay. Les excès pluviaux, qui démentent sa pondération de façade, doivent être retenus et médités par les lecteurs qui auraient la tentation d'attacher une signification trop prépondérante aux moyennes, aussi bien pour les débits que pour les pluies. Nous nous hâtons de signaler que nous n'inclinons pas plus vers la marotte contraire, trop répandue, en notre « triste époque » et qui dénie tout sens aux moyennes. La connaissance de celles-ci demeure indispensable et irremplaçable. Mais elle est absolument insuffisante pour donner une idée juste des phénomènes, et ce d'autant plus que les moyennes intègrent et donc dissimulent plus de grands écarts possibles. Or, les inégalités, les différences pluviales dans une saison donnée d'une année à l'autre, puis la probabilité de pluies réellement formidables, sur de grandes étendues à la fois, ne caractérisent point ou guère le Brésil tropical autour de Rio de Janeiro et dans l'arrière-pays, malgré les contrastes rappelés ci-dessus pour les moyennes saisonnières. Mais le bon équilibre des moyennes mensuelles pluviales dans le Brésil du Sud et l'Uruguay, cache le risque en n'importe quels mois de graves sécheresses ou de pluies désastreuses. Disons en passant qu'il en est de même, et de façon encore plus violente, pour les pluies de quelques heures à un jour dans la majeure partie de la Nouvelle-Zélande (8).

Donc les climats avec précipitations mensuelles sensiblement égalisées peuvent fort bien ne pas exclure ou même favoriser la genèse de crues affreuses et vice versa. D'autre part, l'exemple du Paraiba et du Rio Grande brésilien nous a montré des pluies régulièrement très médiocres ou nulles chaque année pour ainsi dire, pendant des mois sous de fortes températures, et par conséquent des facteurs d'ari-

---

(8) Mais l'on tomberait dans un simplisme aussi absurde en s'imaginant que toute répartition pluviale bien équilibrée, selon les moyennes, implique la possibilité d'averses à tout démolir. Cela ne semble point ou guère être le cas en Ecosse ni en Norvège occidentale ou au Chili méridional.

dité prononcée, même catastrophique, selon les formules les plus célèbres, comme celles de Thornthwaite. Or, des tares climatiques aussi fâcheuses n'empêchent point lesdites rivières de conserver, dans leurs étiages les plus creux, des écoulements plus qu'honorables. Ces particularités tiennent à celles de la nature du sol. Mais, en d'autres régions, ce facteur peut tout aussi bien comporter des caractéristiques inverses de celles dont on vient de voir les effets avantageux. Et pour plus de précision, les terrains peuvent ne point se montrer aptes à retenir et à lâcher lentement de vastes volumes liquides infiltrés; d'où l'aggravation des indigences imposées aux débits fluviaux par les pénuries pluviales régulières, comme durant la saison la moins chaude dans toute une partie de l'Afrique tropicale anciennement française; ou lors des sécheresses occasionnelles, dans les pays à moyennes saisonnières mensongèrement équilibrées de façon très rassurante en ce qui concerne les pluies. Nous verrons que c'est le cas le plus commun dans la région subtropicale examinée ci-dessous.

2. **Crues de l'Iguazu.** — Une influence aussi nuisible des terrains ne joue pas dans le régime de l'Iguazu, dernier gros affluent méridional, ou plutôt sud-oriental, du Parana moyen. L'Iguazu débouche dans ce fleuve à 193 km en aval des fameuses chutes de Guayra. Et il se brise lui-même dans une cataracte deux fois plus haute que celle du Parana, 23 km avant la rencontre avec ce dernier. Il n'a pas eu, durant 21 années, d'étiage inférieur à 4,63 l/s/km^2. Or, il s'agissait d'une pénurie peut-être centenaire ou même d'intervalle moyen plus grand, survenue en 1944.

Par contre, la violence annoncée plus haut pour les crues subtropicales s'impose à l'attention pour cette rivière. Le maximum du 9 juin 1936 aurait débité, selon F.-A. Soldano (9), 25 000 m^3 à Tipo (3,5 km en amont des chutes). Ce flot à l'issue de 48 000 km^2 impliquerait 114 pour A, valeur digne des très grandes crues indiennes, les plus massives du monde pour de telles surfaces réceptrices. D'après le niveau atteint et la largeur, ce débit, quoique très extrapolé, ne nous paraît point du tout inacceptable. Cependant nous estimons moins hasardeux d'admettre seulement 15 000 à 20 000 m^3, soit 68,5 à 91,5 pour A, chiffres triples de ceux qu'on trouverait pour le Paraiba inférieur et à peu près doubles de ceux que peut offrir le Rio Grande. La date de ce phénomène et celle du deuxième maximum connu (novembre 1937) suggèrent (la chose est exacte) que les plus

---

(9) Soldano (F.-A.). *Regimen y aprovechamiento de la Red fluvial argentina.* Buenos Aires, Editorial Cimera, gr. in-8°, tome I, 277 p., 180 fig. et pl., et tome II, 264 p., 189 fig. et pl. Cf. M. Pardé, *Sur le régime des cours d'eau argentins, uruguayens, paraguayens et sud-brésiliens,* op. cit.

hautes eaux ici, apparaissent à la fin de l'automne et au milieu du printemps. Les moyennes maxima mensuelles de juin et de septembre-octobre, confirment la cessation de la prépondérance estivale, incontestée dans la zone tropicale, plus au Nord (10).

Et la puissance du débit en question, même si l'on doit adopter pour lui le chiffre le moins gros envisagé ci-dessus, nous enseigne clairement la possibilité d'averses bien plus fortes, en un à quelques jours sur plusieurs dizaines de milliers de km² à la fois, que dans les bassins plus septentrionaux.

3. **Le Jacui et le Taquari.** — A. *Débits maxima.* — Dans ce domaine cependant les températures moyennes annuelles doivent dépasser 20°. Elles deviennent bien plus franchement subtropicales avec 18 ou 19° en plaine dans les cours inférieurs, 15 à 18 dans les bassins supérieurs pour le Jacui, fleuve principal uniquement brésilien du Rio Grande do Sul, et pour son maître affluent le Taquari. Vers son embouchure à Porto Alegre le Jacui a pris le nom de Guaiba.

En ce lieu, le débit maximum, à vrai dire très extraordinaire, de mai 1941, représente environ 25 000 m³, pour 82 000 km², soit 331 l/s/km² et 86,8 pour A. Phénomène plutôt pire que le cataclysme de mars 1936 sur la très redoutable Susquehanna en Pennsylvanie (11).

A l'amont les coefficients A sont un peu moindres. On aurait pour le Taquari à Bom Retiro (24 900 km²) 12 000 m³ et 75,5 pour A. Cependant à Mussum le maximum de la même rivière n'a pas été de loin supérieur à son devancier d'octobre 1950 (printemps). Puis à Lageado, entre Mussum et Bom Retiro, la crue de juillet 1940 atteignit 19 m. Et elle a été dépassée de 1 m seulement ou d'un peu plus par celle de 1941. Enfin celle de septembre 1928 n'a pas dû être très inférieure à celles de 1940 et de 1950. Le flot du Jacui moyen, lui, paraît avoir excédé de 100 % au moins le record antérieur avec 13 300 m³ à Cachoeira (30 466 km²), soit encore 76,2 pour A. Plus haut, en la circonstance les maxima semblent avoir été relativement moins forts à Mussum sur le Taquari, et surtout sur le Guaporé et

---

(10) Cependant l'Ivai, voisin septentrional de l'Iguazu, doit présenter déjà certaines caractéristiques subtropicales.

(11) 20 900 m³ pour 62 400 km², soit 335 l/s/km² et 84 pour A à Harrisburg sur la Susquehanna inférieure. Mais nous connaissons depuis juin 1889 deux autres crues pas beaucoup moindres que celle de mars 1936 au même lieu. Sur le Guaiba le phénomène de mai 1941 semble d'une fréquence très rare (peut-être 2 ou 3 événements de cette grandeur en 1 000 années). D'autre part, la crue susdite de la Susquehanna, comme celle de juin 1889 sur le même fleuve, a été bien plus brève que celle de mai 1941 sur le Guaiba. La croissance a duré à Porto Alegre une quinzaine de jours, et à Harrisburg en mars 1936, pas même 60 heures à cause d'une alimentation pluviale par une seule averse, un peu renforcée par la fonte des neiges. On verra que la genèse fut très différente, et tout le contraire de simple, pour l'inondation fameuse du Guaiba.

le Carreiro affluents de cette rivière, puis à Bela Vista sur le haut Jacui.

	S (km²)	Q (m³/s)	Q (l/s/km²)	A
Taquari à Mussum.	16 078	8 390	520	66,2
Guaporé.	2 121	1 790	840	38,9
Carreiro.	1 924	1 740	940	39,2
Jacui à Bela Vista.	3 812	1 620	425	26,2

Certes, aux trois dernières stations les maxima réels ont pu être nettement supérieurs aux chiffres mentionnés et qui doivent correspondre soit à des débits journaliers moindres que les pointes, soit à des données insuffisamment extrapolées. Cependant nous serions surpris que les maxima authentiques veuillent plus de 50 sur le Guaporé et le Carreiro et de 40 à Bela Vista. Cette infériorité du coefficient vers l'amont par rapport à ses taux d'aval suffirait à montrer ses graves imperfections (12). Cependant sa progression dans le cas considéré vers l'aval concorde bien avec une réalité peu douteuse.

Par rapport aux crues-records notées en d'autres pays de climats analogues, les flots de mai 1941 ont été beaucoup plus remarquables sur les cours inférieurs du Taquari et le cours moyen du Jacui, et surtout sur le Guaiba que dans les hauts bassins. Certaines crues françaises en dehors des régions vivaroises et cévenoles, où elles se révèlent monstrueuses, doivent ne pas être beaucoup moins fortes que les records du Carreiro, du Guaporé, du haut Jacui. Et le cataclysme du Tarn à Moissac en mars 1930 (8 000 m³ pour 15 700 km², 64 pour A) a presque valu les plus grandes eaux du Taquari à Mussum. Mais aucune rivière européenne ne peut, il s'en faut de beaucoup, rouler pour 25 000 et 30 000 km² des maxima égaux à ceux du Taquari à Bom Retiro et du Jacui à Cachoeira. Les chiffres les plus forts pour des bassins de ce genre sont, dans notre pays, 8 500 à 9 500 m³ pour 33 000 km² de la Loire et de l'Allier réunis à leur confluent (octobre 1846 et septembre 1866) et 8 000 à 9 000 m³ pour 35 000 km² de la Garonne à Agen en juin 1875. Et ailleurs en Europe on ne trouve point de concurrence sérieuse à ces nombres.

Quant au flot du Guaiba à Porto Alegre, on ne se trompe guère en affirmant qu'il égale en gros au moins deux fois les débits les

---

(12) Pour que A conserve à peu près ses valeurs initiales d'amont en aval, il faut qu'il y ait discordance assez sensible entre les maxima des rivières confluentes. Sinon A s'accroit sans cesse vers l'aval. Cependant, si les discordances sont trop marquées et les renforts de l'aval très faibles, A diminue à partir de l'amont, et dans des proportions considérables bien entendu si le maximum brut se réduit lui-même par aplatissement.

plus célèbres des fleuves européens pour des bassins de grandeurs analogues. Citons à cet égard 11 000 à 12 000 m³ (novembre 1840 et mai 1856) pour 95 500 km² du Rhône à Beaucaire, 12 800 m³ pour 42 030 km² du Pô à Piacenza (novembre 1951), 13 000 à 15 000 m³ pour 91 700 km² du Douro à Bitetos (décembre 1909), 11 500 pour 14 612 km² du Rhin à Cologne (janvier 1926), 13 000 à 14 000 pour 101 500 km² du Danube à Vienne (août 1501).

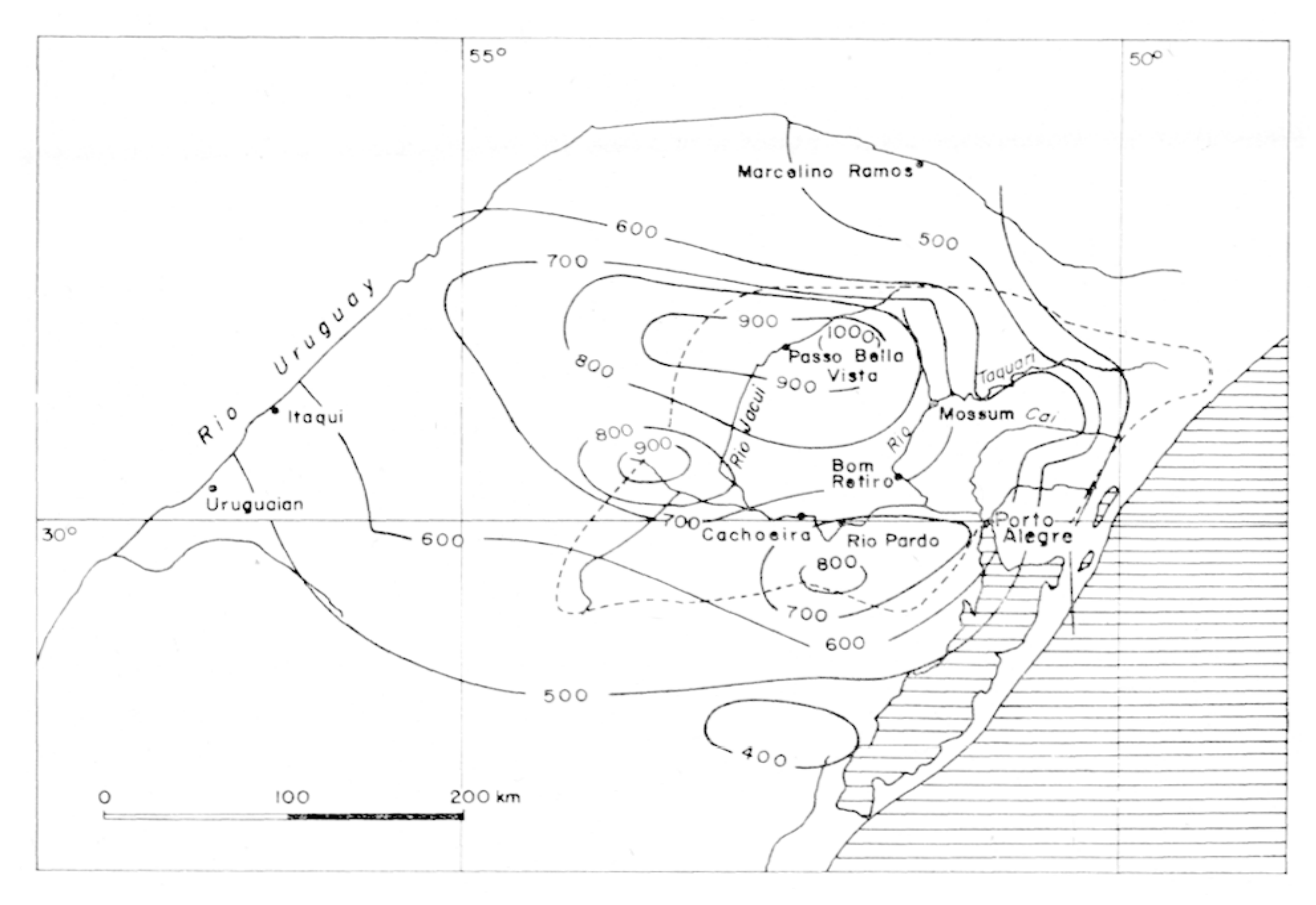


Fig. 1

Pluies mémorables du 10 avril au 15 mai 1941 sur les bassins du Guaiba (Jacui) et de l'Uruguay supérieur.

(D'après MM. Rochefort *(op. cit.)* et la Divisao de Aguas du Brésil.)

Et les maxima susdits des rivières brésiliennes en question semblent encore plus démesurés si on les compare aux étiages des mêmes cours d'eau. Le minimum connu du Jacui à Bela Vista représente encore 2,9 l/s/km². Mais en aval c'est un effondrement, puisque le record d'indigence a fait seulement 0,30 l/s/km² à Cachoeira (moins de 10 m³), et 0,12 à Mussum pour le Taquari, soit 1,9 m³. Ce minimum est en valeur spécifique le 1/36 de celui du Paraiba do Sul, le 1/38 de celui de l'Iguazu et moins de deux millièmes du débit

maximum de 1941. Donc, aucun doute sur l'infimité et le prompt épuisement des rétentions qui peuvent se constituer dans les terrains des domaines fluviaux ici en cause.

B. *Quelques caractéristiques morphologiques du réseau.* — Or le haut bassin du Jacui et surtout celui du Taquari sont élevés et accidentés. Tous deux naissent dans des plateaux basaltiques, le premier vers 730 m d'altitude, le second vers 1 400 m, pour descendre d'abord vers l'Ouest puis le Sud-Ouest et ensuite droit du Nord au Sud vers une dépression sédimentaire large, basse et orientée d'Ouest en Est. Elle est suivie jusqu'à Porto Alegre par le Jacui lui-même après un coude, brusque dans l'ensemble, qu'il décrit à l'amont de Cachoeira. Mais le Taquari inférieur ne fait que la traverser en s'infléchissant quelque peu vers le Sud-Est pour rejoindre le Jacui (fig. 1).

Les pentes, dans les cours supérieurs, sont fortes ou très fortes, très irrégulières pour le Taquari ; et ensuite pas médiocres (plusieurs dizaines de cm par km) sauf pour le Jacui moyen et inférieur, dans son large parcours Est-Ouest (0,07 m par km, après 0,80 m puis 1 mètre à l'amont du grand coude).

D'autre part (et le fait est très important) ces rivières sont profondément encaissées presque partout sauf pour le Guaiba, soit entre des versants rocheux, soit plus loin entre leurs propres alluvions où les berges à peu près insubmersibles dominent l'étiage de 15 à 20 m. Ces caractéristiques accélèrent les propagations donc les évolutions des crues. Leur effet s'atténue ou disparaît cependant pour le Jacui sur ses 150 à 180 derniers kilomètres. Car ici, malgré l'élévation persistante des rives en dehors du secteur final, de vastes submersions exercent l'influence ralentissante et modératrice dont nous verrons le résultat.

En outre les réseaux supérieurs, surtout pour le Taquari, sont nettement, quoique imparfaitement évasés et ramifiés avant concentration. Ces conformations, nettement réalisées ici pour des bassins et des surfaces réceptrices pas supérieures à 10 000 ou 15 000 km^2, sont très favorables à la genèse de crues très rapides et donc fort puissantes. Là-dessus, dans notre esprit, et d'après notre expérience des débits maxima et de leurs causes, aucun doute.

C. *Les pluies responsables.* — Les débits maxima sur le Jacui et le Taquari supérieur, le Guapore, le Carreiro, etc, devraient dépasser les chiffres que nous avons vus si les précipitations responsables, pour quelques centaines ou quelques milliers de km^2, étaient sensiblement plus denses en quelques heures, puis en 1 ou 2 jours que

sur les Pyrénées centrales et orientales, les Préalpes du Nord et les Vosges ou le Jura.

Et de fait nous trouvons seulement pour les plus grosses pluies, en un jour officiel d'avril ou de mai 1941, 132 mm à une station, 128 à une autre, puis 115, 111, etc. Nous connaissons autant ou plus pour maints postes français dans les régions susdites; et notammment durant 24 heures, dans les Vosges : 170 mm à Saulxure et 185 à Wildenstein en décembre 1947, 192 mm au lac de la Lauch en janvier 1910; 167 au lac d'Alfeld et 163 à Mittlach en décembre 1919; puis dans les Pyrénées (13) 194 et le lendemain 142 mm à Laruns, 181 et 190 à Massat, en février 1952; 230 à Barèges et 167 à Bagnères de Bigorre le 23 juin 1875.

Et certainement aussi la zone tropicale brésilienne entre Rio de Janeiro, Sao Paulo et le Parana doit éprouver par places des averses journalières plus brutales. Le professeur H. O. Sternberg a cité 405 et 370 mm en un jour à deux stations situées sur le littoral de l'Etat de Sao Paulo.

D'ailleurs, pour le Rio Grande do Sul et notamment pour le bassin du Guaiba, M. Rochefort a repéré des chutes d'eau bien supérieures en certains points à celles d'avril-mai 1941, durant un jour officiel; à savoir une pluie de 310 mm et plusieurs de 200 mm et plus. Mais selon toute vraisemblance ces averses ne font rage qu'au cours de phénomènes localisés, peut-être orageux. Ils ne doivent point intervenir dans les caractéristiques des précipitations extensives dont résultent les gonflements les plus notables du Jacui et du Taquari jusque sur leurs cours inférieurs.

Puis M. Rochefort nous fournit un autre renseignement chargé de sens. Pour toutes les stations pluviométriques du bassin en question, on connaît au moins une pluie de 110 mm ou plus en un jour officiel. Cela nous suggère que lors des grandes averses, les précipitations génératrices de graves ruissellements ne se limitent point aux parties montagneuses bien exposées par rapport aux vents pluvieux. Des genèses frontales, c'est-à-dire des luttes entre masses d'air thermiquement contrastées doivent agir un peu comme dans la plaine centrale des Etats-Unis (14), et soumettre les régions basses sud-brésiliennes, lors des averses de vaste extension, à des pluies d'une puissance inconnue, pour de telles circonstances, en un à deux jours,

---

(13) Vers l'extrémité des Pyrénées-Orientales des déluges méditerranéens extravagants peuvent se produire; peut-être plus de 1 000 mm en 24 heures d'octobre 1940 par places sur le versant méridional du Canigou.

(14) Celle-ci nous semble cependant au moins jusqu'à plus ample information plus exposée que le Rio Grande do Sul et les bassins uruguayens à des averses torrentielles, exorbitantes, de quelques heures à un jour, sur quelques dizaines ou centaines de km².

sur les plaines d'Europe non méditerranéenne. Facteur éminemment favorable à l'aggravation relative des crues vers l'aval. Et cela doit suffire à rendre les maxima en question de plus en plus imposants, par comparaison avec ceux de nos rivières, à mesure que le bassin s'amplifie.

Si nous additionnons les précipitations de 8 et de 15 jours ou d un mois dans le bassin sud-brésilien considéré, nous trouvons des chiffres bien plus élevés que dans les domaines de la Saône, du Rhin, du Danube, etc ; et d'autant plus supérieurs aux arrosages français, allemands, etc, qu'ils s'appliquent à plus de durée. Entre le 21 avril et le 6 mai 1941 (succession pluvieuse à vrai dire très extraordinaire par la répétition des averses et par les lames d'eau totales), on a relevé 752 mm à Soledad entre le Jacui et le Taquari supérieurs, 680 à Cruz Alta (haut Jacui), 691 à Santa Maria, station peu élevée du Jacui moyen, 500 à 550 dans presque toute la dépression Est-Ouest et un peu plus au Nord, jusqu'à 600 au Sud, encore 464 à Porto Alegre. Nous n'hésitons point à dire qu'à Tours, à Toulouse, à Montauban, à Cahors, à Mâcon, les pires chutes d'eau totales possibles en 15 jours ne dépasseraient point la moitié ou le tiers de ces valeurs. Et la supériorité des pluies sud-brésiliennes en question se révèlerait moindre sans doute mais encore énorme, si l'on pouvait comparer les records de Saint-Claude, Thônes, Saint-Pierre de Chartreuse, Laruns, Barèges, Ballon de Servance, etc avec ceux de Soledad, Cruz Alta, Santa Maria.

Le même avantage redeviendrait beaucoup plus accablant si nous faisions porter les comparaisons sur des ensembles respectifs de plusieurs dizaines de milliers de km². L'écart augmenterait encore sans doute si nous envisagions à la fois pour le Brésil, l'Argentine et l'Uruguay, 200 000 ou même 300 000 km².

Au premier examen des isohyètes, il semble qu'on trouverait pour cette dernière et très imposante étendue, au moins 550 mm en 34 jours et 400 ou 450 en 15 jours d'avril-mai 1941. Rien de pareil à beaucoup près, sur une surface totale aussi vaste d'un seul tenant ne nous semble concevable en Europe. Ou bien encore aucun bassin européen aussi spacieux que celui du Guaiba (82 800 km²) n'a reçu à notre connaissance plus de 275 à 300 mm en deux semaines (15) : Rhône, pour 95 500 km², 300 à 320 mm en 21 jours du 28 octobre au 18 novembre 1840, 260 mm du 7 au 20 novembre 1935 ; Pô, jusqu'à

(15) Par contre pour une semaine ou 4 à 5 jours, les pluies européennes sur plusieurs dizaines de milliers de km² doivent mieux rivaliser avec celles qui menacent le Rio Grande do Sul et l'Uruguay. Les totaux pour de telles durées, en ces pays, n'ont pas dû excéder de plus de 30 à 40 % les averses suivantes : 236 mm en 6 jours de novembre 1951 sur 70 000 km² du Pô, et 200 à 220 mm en 7 jours sur 95 500 km² du Rhône en octobre-novembre 1840.

Ponte Lagoscuro, pour 70 000 km², 376 mm du 21 octobre au 10 novembre 1928, 300 à 320 mm du 6 au 20 novembre 1951 ; Loire, jusqu'à Montjean, pour 110 000 km², peut-être 230 à 250 mm au total lors de deux crues successives, l'une grande et la seconde mémorable du 15 au 30 mai 1856.

Or, M. Rochefort et nous-même ne devons guère nous tromper en admettant pour deux semaines (21 avril-6 mai 1941) sur tout le bassin du Guaiba, 500 mm et plutôt 550 ; sur le Taquari avant Mussum, 435 mm dont 200 en 5 jours et 175 en 3 jours. En 28 jours, le Guaporé a reçu 680 mm, le Carreiro 650 ; l'ensemble du domaine du Taquari au moins 480 sinon 500 mm en deux semaines. Et du 15 avril au 12 mai le Jacui, sur 30 466 km², avant Cachoeira, aurait subi 750 à 780 mm et peut-être 600 en deux semaines. Son cours supérieur avant Bela Vista aurait été gratifié de 690 mm. Enfin, on peut encore compter 700 mm ou plus pour tout le bassin jusqu'à Porto Alegre du 10 avril au 15 mai.

En réalité, l'arrosage se fit en 6 phases principales, dont certaines doubles. La dernière chute, les 11 et 12 mai, ne servit qu'à produire une recrudescence modérée sur le haut Jacui, sérieuse sur le Taquari et à ralentir la décrue à Porto Alegre. Et les averses antérieures au 20 ou au 21 avril eurent pour principal effet de commencer la saturation du sol précédemment assez sec, tout en engendrant une première pulsation bénigne.

Le gros de la pluie d'où résulta la formidable inondation s'abattit durant 15 jours en 3 averses de 3 à 5 jours pour chacune, et les chutes très abondantes (du 21 au 24 et du 26 au 30) ont comporté chacune deux phases séparées par une brève pause.

D. *Mécanismes monogéniques ou polygéniques.* — Et c'est la répétition des averses qui, en avril-mai 1941, a rendu la crue aussi exceptionnelle sur le Guaiba, et déjà sur la dernière partie du Jacui moyen dans la dépression transversale. Expliquons mieux la chose en examinant d'abord ce qui ne se produit pas dans le bassin en question.

Supposons que le Jacui avant jonction avec le Taquari ait une longueur, des pentes, des sections mouillées analogues à celles de son affluent. Après une seule averse, donc lors d'une crue monogénique, les ondes principales des deux rivières se superposeraient plus ou moins totalement au point de rencontre, et le maximum combiné, en aval présenterait une puissance relative plus grande qu'à l'amont d'après le coefficient A sur chacune des deux branches. Mais la baisse à peu près simultanée sur les deux rivières interviendrait aussitôt après le passage de la pointe. Il suffirait d'un jour ou deux pour qu'elle soit profonde. Puis considérons une succession d'averses

comme celle qui a eu lieu en avril-mai 1941. Il s'ensuivrait sur le collecteur principal comme sur les branches mineures autant de crues bien distinctes que de pluies successives pourvu que l'intervalle entre ces précipitations dure au moins un jour et un jour et demi (16). En d'autres termes, les configurations morphologiques, les longueurs, les tracés des rivières qui favorisent les crues monogéniques empêchent, aux cas de séries pluvieuses, les crues élémentaires successives de se combiner, de s'interférer en produisant à l'aval une grosse intumescence polygénique à une seule pointe. Simplement chaque épisode ruisselant bénéficie de la phase précédente, grâce à la saturation plus sensible du sol, et à la grandeur accrue, entre chaque évènement des débits « de base » décroissants, ceux sur lesquels la nouvelle vague se hisse. Ainsi, dans l'ensemble le total des pluies successives en une ou plusieurs semaines importe beaucoup moins à la puissance des maxima que ne le fait le plus gros chiffre pluvial moyen en quelques heures, pour quelques centaines de km² montagneux, ou en 1 à 2 jours pour 5 000 à 15 000 ou 20 000 km² (ordres de grandeurs).

Cette règle fondamentale pour la genèse des crues, s'est vérifiée de façon spectaculaire en avril-mai 1941 sur le haut Jacui, et surtout sur le Taquari, modèle de violence (17), faute de grands débordements amortisseurs jusqu'à la fin de son cours. A Bom Retiro où pourtant cette rivière draine 24 900 km², elle a subi du 20 avril au 5 mai 5 poussées distinctes (fig. 2), les deux plus hautes survenant le 2 mai (plus de 17 m) et le 5 (18,40 m). La baisse intermédiaire ne fut pas inférieure à 6,50 m et elle avait dépassé 4 m après la pointe du 24 avril. Le Guapore, le Carreiro ont oscillé de même, et le haut Jacui un peu moins vivement parce qu'il émane d'un relief moins accidenté et moins élevé.

A Cachoeira (30 466 km²) sur le cours moyen (fig. 3), le Jacui est devenu moins immédiatement sensible aux interruptions et aux reprises des pulsations pluviales, mais avec des chiffres très médiocres (guère plus d'un mètre, puis moins de 25 cm) pour les baisses intermédiaires. Et ces oscillations hydrométriques deviennent tout à fait secondaires et même finissent par ne plus guère compter dans l'évolution générale du phénomène; au point que pour celui-ci on peut se rallier sans inexactitude sérieuse à la reconnaissance d'une montée

---

(16) Au cas d'intervalle limité à un jour et surtout si la pause ne se manifeste que pendant quelques heures, on observera autant de crues élémentaires que d'averses vers les sources, mais ces flots tendront pour plus de 10 000 ou de 20 000 km² à s'anastomoser sur les artères maîtresses.

(17) En octobre 1950 à Bom Retiro, la rivière monta de 13,10 m en 14 heures. A Lageado, entre Mussum et Bom Retiro, le niveau passa de 2,50 m le 13 juillet à 19 m le 16; et en 1941 on cota 6,90 m le 30 avril, 19,20 m le 2 mai (avant-dernière poussée). A Cachoeira, le Jacui peut croître de quelques mètres en un jour, variation déjà très rapide.

principale unique. Cette conception devient totalement et littéralement véridique à Rio Pardo (fig. 4), où le bassin s'est accru d'environ 8 500 km² modérément ou point accidentés, pour un parcours de

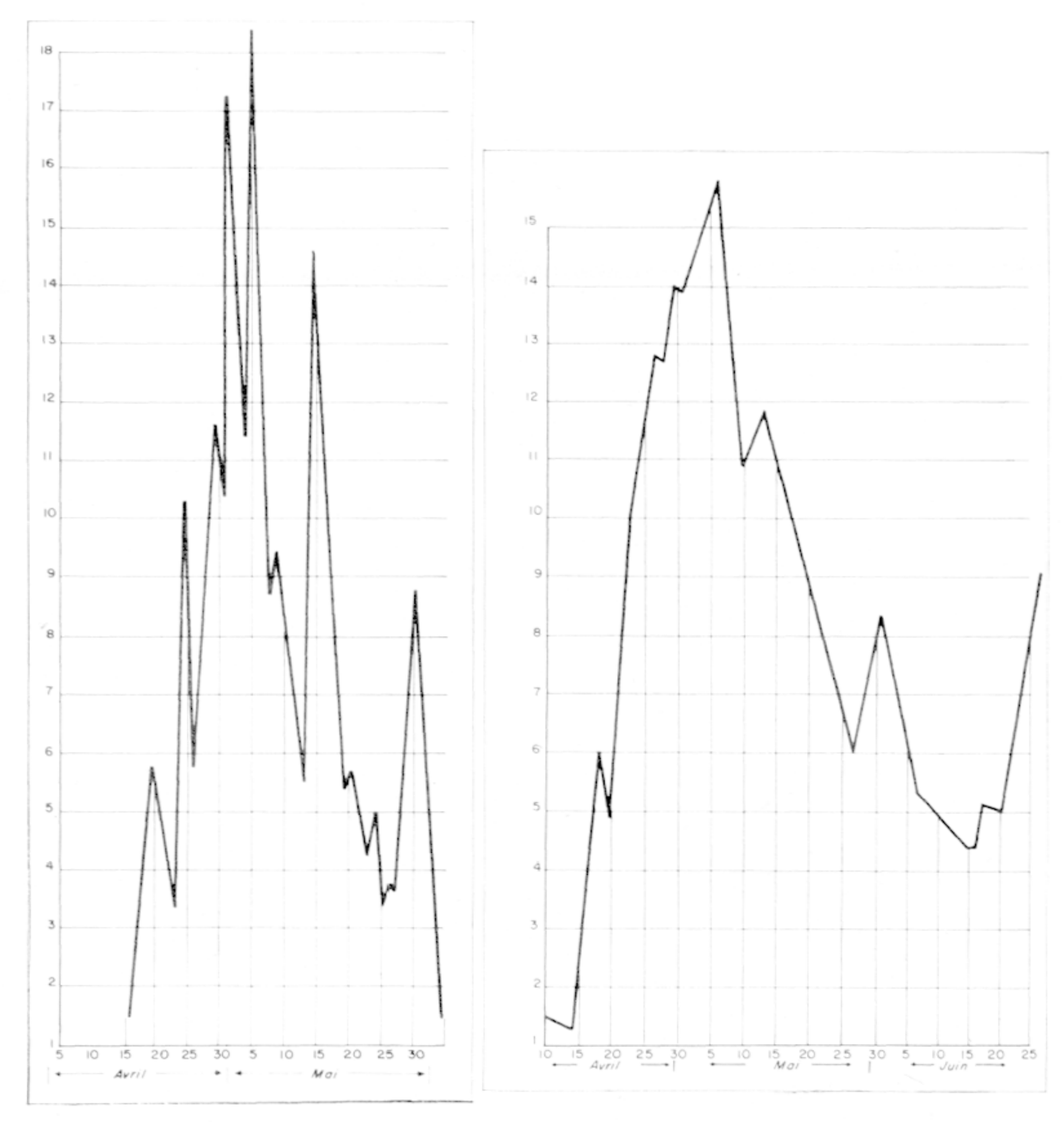


Fig. 2

Les poussées successives très aiguës du Taquari à Bom Retiro, en avril-mai 1941.

(D'après la Divisao de Aguas du Brésil et la S.O.G.R.E.A.H. de Grenoble.)

Fig. 3

Le Jacui à Cachoeira en avril-mai 1941.

Quatre poussées élémentaires contre cinq pour le Taquari sont reconnaissables avec de faibles baisses intermédiaires (Même source).

78 kilomètres seulement. La métamorphose par simplification a pour cause le déphasage qui affecte les interventions respectives des petits affluents, puis l'affaiblissement majeur de la pente, et encore plus

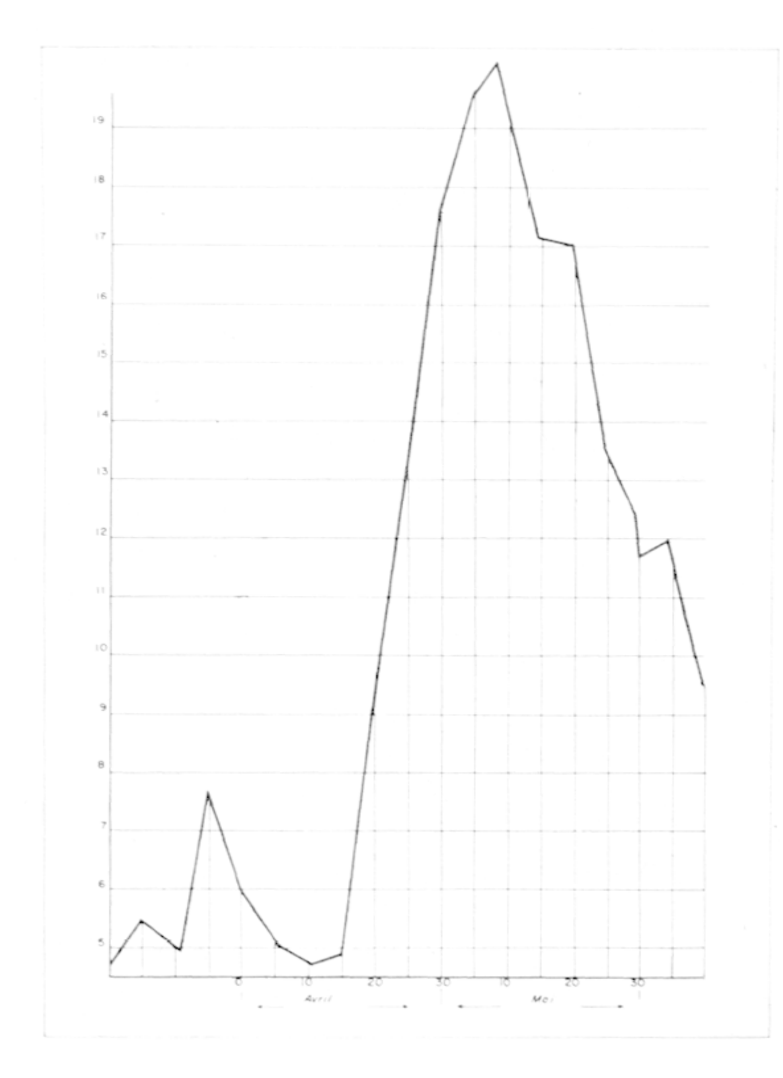


Fig. 4

Le Jacui à Rio-Pardo en avril-mai 1941.

Toutes les poussées élémentaires se fondent en une apophyse d'apparence simple avec une croissance continue.

sans doute, l'étalement dans le réservoir compensateur naturel que constitue le vaste champ d'inondation en aval de Cachoeira.

Ainsi s'expliquent, en contrepartie d'une impossibilité (18) pour les combinaisons monogéniques graves sur ce réseau disproportionné, et mal convergent au sens large du terme, les phénomènes polygéniques dont la crue de mai 1941 offre un exemple grandiose, avec 5 épisodes pluvieux et autant de poussées élémentaires rapprochées. Ce mécanisme fut bien plus typique encore, sur le Guaiba que sur le

(18) Cette impossibilité ne cesserait en partie que par le fait d'une durée tout à fait anormale (3 à 4 jours) pour une seule averse ou par la réduction à qaelques heures des pauses entre les phases de pluie efficaces, si rapprochées qu'on pourrait encore conclure à une averse unique Ainsi le flot principal du Taqaari se superposerait-il à des eaux croissantes déjà très grosses du Jacui. La concordance serait encore imparfaite (le relief, les tracés du réseau le veulent ainsi) mais pas du tout bénigne. Cependant des averses uniques à la fois puissantes et aussi longues sur des dizaines de milliers de km² sont très peu fréquentes.

Jacui entre Cachoeira et Rio Pardo. Le deuxième maximum du Taquari s'est additionné plus ou moins complètement au premier flot du Jacui, arrivé avec 2 jours ou un peu plus de retard sur l'onde qui avait été contemporaine vers ses sources comme sur celles du Taquari. Le troisième gonflement de ce dernier s'est combiné avec le deuxième du Jacui et ainsi de suite. Grâce aux interférences susdites et aux

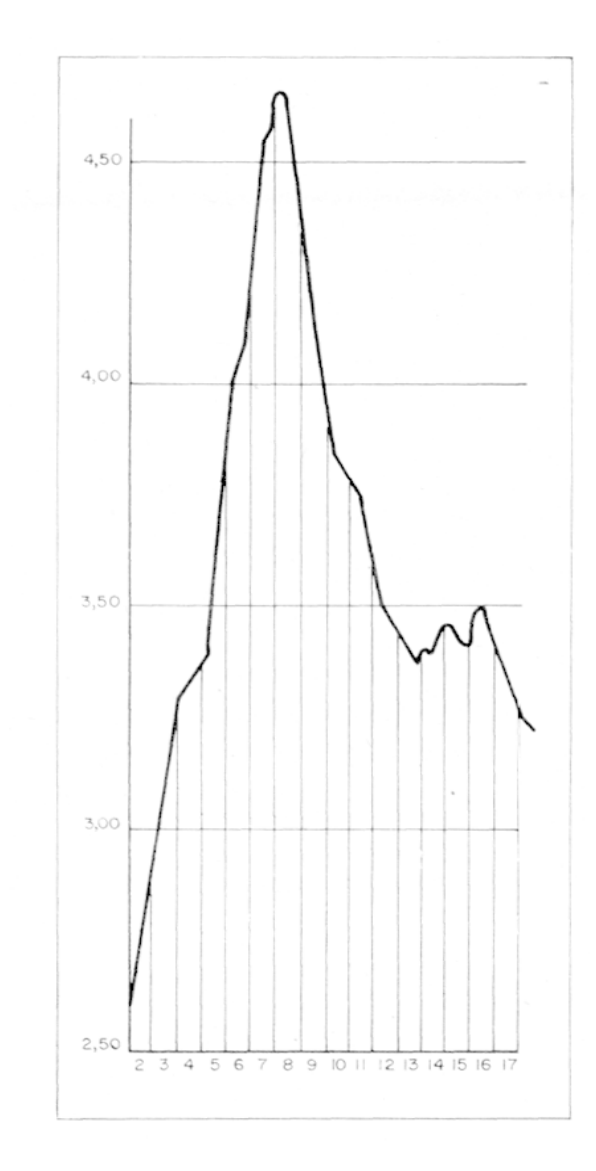


Fig. 5

Le Guaiba à Porto Alegre en avril-mai 1941.

supériorités jamais démenties au confluent des flots croissants arrivant d'une rivière, lorsque l'autre fournissait des eaux décroissantes, le fleuve monta de façon continue à Porto Alegre (fig. 5). Il n'y dépassa point 4,65 m le 7 (contre 3,20 m pour le record antérieur).

La mesquinerie apparente de ce niveau par comparaison avec les 15 à 20 m cotés aux principales stations d'amont entre berges élevées s'explique par l'élargissement et l'approfondissement et donc par la

grandeur de la section mouillée. A l'amont proche de Porto Alegre, celle-ci atteignait environ 9 000 m² pour le lit entre berges, large de 700 m et profond de plus de 12 m. En outre l'inondation était très vaste.

Le maximum du Guaiba nous paraît dû à l'addition des flots suivants : 18,50 à 18,75 m du Jacui en voie de croissance à Rio Pardo contre une apogée ultérieure de 19,39 m le 7, et 18,40 m représentant la dernière pointe du Taquari à Bom Retiro. En somme, grâce à la répartition des averses dans le temps comme dans l'espace, la superposition polygénique des deux ondes constituantes principales a dû se réaliser à 90 ou à 95 % près par rapport à la somme des deux maxima. Elle a donc été presque parfaite, c'est-à-dire éminemment funeste.

E. *Quotients d'écoulement.* — Comparons maintenant, avec M. Rochefort, les pluies évacuées durant toute l'intumescence avec les lames d'eau reçues pendant à peu près 28 jours au total. Après la défalcation indispensable des débits qui se seraient écoulés si les hautes eaux n'avaient pas eu lieu, nous trouvons : 56 %, chiffre peut-être un peu faible sur le Taquari à Mussum, 59 % sur le Guaporé, 67 % sur le Carreiro, 70 % sur le Jacui, sensiblement plus arrosé, à Cachoeira, 62 % à Bela Vista, probablement 60 à 65 % à Porto Alegre.

A première impression ces pourcentages paraissent relativement médiocres. Lors de la crue polygénique gigantesque de janvier-février 1937, sur l'Ohio, pour les 528 000 km² du bassin total, aussi grand que la France, le rapport des pluies écoulées aux pluies tombées, cependant point supérieures à 193 mm en 12 jours (contre plus du double sur le Taquari et le Jacui dans le même temps en 1941) a représenté 86,8 %. Mais le rendement des pluies qui ont alors agi sur la rivière nord-américaine a bénéficié des températures assez basses voulues par la saison, malgré la tiédeur relative due à l'origine tropicale de l'air humide. Et surtout le sol était exceptionnellement saturé au début de la succession pluvieuse décisive.

Le 10 avril 1941, le bassin du Jacui possédait encore une grosse capacité d'absorption. C'est d'ordinaire le cas, aussi bien dans les régions subtropicales point trop pluvieuses en été que dans les nôtres au début de l'automne (19). Comme de juste, lors des séries

(19) Pour les valeurs-types en question, cf. M. PARDÉ, *Sobre los coefficientes y deficit de Desagüe de las Grandes Crecidas.* Geographica, Saragosse, janvier-décembre 1956, pp. 3-29, 5 fig. Et sur les coefficients et déficits d'écoulement des très grandes crues (même article), Annales de l'Institut Polytechnique de Grenoble, 1954, pp. 106 129.

pluvieuses, les dernières averses s'écoulent dans des proportions bien plus fortes que pour les premières. Cette progression, classique autant que logique, n'a point manqué dans le domaine du Jacui en avril-mai 1941. Nous le montrerons vers la fin de ce mémoire, en cherchant à expliquer et à décomposer par comparaison avec les coefficients d'écoulement trouvés sur le Jacui en 1941 les valeurs analogues applicables à la crue grandiose d'avril 1959 sur le Rio Negro de l'Uruguay.

III. Le Rio Negro de l'Uruguay en avril 1959

Pour ce phénomène relativement fantastique, notre information est meilleure à certains égards et moins bonne en d'autres domaines que relativement aux méfaits du Jacui et du Taquari. Nous avons sur les débits de la rivière uruguayenne à une station, des renseignements plus sûrs que pour n'importe quel poste du Guaiba et de ses rameaux constituants, surtout en ce qui concerne les très hautes eaux de ces derniers. Mais pour le réseau supérieur du Rio Negro nous ne possédons aucune donnée hydrométrique. Nous avons sur les pluies totales responsables en un mois à peu près une bonne carte d'isohyètes établie grâce aux observations faites à 84 postes (20).

1. **Caractéristiques géophysiques sommaires du bassin.** — A. *Tracés et reliefs.* — Le Rio Negro est un affluent occidental de l'Uruguay inférieur. Il rejoint ce fleuve après avoir drainé tout le centre du pays en aval de Mercedes, en somme près de l'embouchure et donc du Rio de la Plata. C'est la principale rivière presque entièrement uruguayenne. Cependant 3 100 km² du bassin (21) sur environ 70 000 sont situés au Brésil dans le Rio Grande do Sul. Le Rio Negro coule pour l'ensemble du Nord-Est au Sud-Ouest dans un pays de collines dont la médiocre altitude contraste avec les reliefs accidentés et élevés qui se dressent dans toute la moitié septentrionale du

---

(20) Sur l'hydrologie de la rivière et sur le barrage de Rincon del Bonete, nous possédons depuis une dizaine d'années un article de M. le Professeur Adolf Ludin, in Abhandlungen der deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, année 1945-46, nº 7, Berlin 1950, 16 p., 9 fig. dont 7 pl. h. texte. Puis nous avons un mémoire élaboré par plusieurs auteurs : *Usina hidroelectrica de Rincon del Bonete*, Revista de Ingeneria, Montevideo, juillet 1949, 19 fig., nombreuses planches. L'ingénieur suisse Ludwig Meyer a publié un article très documenté : *Die Hochwasser-Katastrophe in Uruguay*, dans un supplément technique de la Neue Zürcher Zeitung du 3 juin 1959 (6 grandes pages bien illustrées). Mais notre principale documentation nous a été fournie par M. Manuel Salles et par M. Alberto Val, ingénieurs en chef à l'Office des Travaux hydroélectriques de l'Uruguay. Ils nous ont adressé de beaux rapports avec une foule de cartes et de graphiques sur la crue d'avril 1959. Enfin l'ingénieur allemand M. F. Siemonsen a bien voulu nous fournir des indications précieuses.

(21) La Seine draine 79 000 km² et la Garonne à Bordeaux 56 000.

domaine drainé par le Jacui et par le Taquari. Les points les plus hauts pour le Rio Negro ne dépassent guère 300 m et presque toute l'étendue se trouve au-dessous de 250 ou même de 200 m. Malgré cela,



FIG. 6

Pluies tombées du 25 mars au 23 avril 1959 sur le bassin du Rio Negro de l'Uruguay.

(D'après l'Ingenieria civil de Obras hidroelectricas.) Le Rio Tacuari, à droite de la figure, n'est pas le Taquari dont traitent les pages précédentes.

les pentes mal régularisées, point régulièrement décroissantes de l'amont vers l'aval, ne sont point trop faibles. Nous voulons ainsi dire qu'elles dépassent sur la majeure partie du cours celles de la Seine

moyenne et inférieure et de la Saône (22). La déclivité atteint en effet 0,29 m par km sur environ 250 à 300 km dans la partie supérieure. Puis, sur 170 km dont 148 occupés maintenant par l'immense réservoir dont il sera plus loin question, à partir du confluent avec le Tacuarembo, principal tributaire venu du Nord, la rivière ne descend plus que de 0,17 m par km.

A partir de Paso de Los Toros, le profil se casse assez nettement et la pente n'est pas en moyenne inférieure à 0,22 m par km sur les 370 derniers km du cours. Celui-ci mesure au total 850 km.

La vallée alluviale du Rio Negro à partir de San Gregorio paraît en maints endroits très large. Mais des reliefs séparant les assez nombreux petits affluents qui débouchent de NNW ou de SSE en aval du confluent avec le Tacuarembo, étranglent plus ou moins, de place en place, l'étendue occupée par le lac artificiel (fig. 6).

Le cours moyen recouvert par celui-ci, comme le long tronçon inférieur, semble construit dans les alluvions. Mais l'encaissement du lit au milieu de ces matériaux doit être notable, peut-être pas beaucoup moindre que pour le Jacui et pour le Taquari inférieur. Et les débordements naturels, avant la création du réservoir, n'étaient sans doute point faciles, pour les crues précédemment connues tout au moins. La rapidité relative de translation et d'évolution nous suggère cette pensée. Puis nous savons qu'à Paso de los Toros, les maxima de l'ordre de 5 000 m^3 (chiffre rarement atteint) cotaient au moins 12 ou 13 m sur l'étiage. Peut-être la hauteur des berges est-elle aussi très grande à l'amont, tout au moins depuis le confluent avec le Tacuarembo.

Au point de rencontre, la surface réceptrice de celui-ci est de l'ordre de 15 400 km^2 contre moins de 14 000 pour le Rio Negro lui-même (23). Un net équilibre des longueurs respectives (un peu plus grandes pour le Tacuarembo) et le caractère évasé, en entonnoir de toute la partie située jusqu'au confluent des deux artères principales, sont on ne peut plus propices aux concordances entre les gros débits, lors des phénomènes monogéniques. Au lieu de convergence doivent donc aboutir avec peu de décalage dans le temps lors d'une averse décisive point trop brève, les flots écoulés dans des branches qui drainent au total 29 000 km^2 sur les 39 200 km^2 situés avant Rincon

(22) Pentes de la Seine, 12 cm par km dans la traversée de Paris, 13,4 entre Suresnes et Mantes, 11,5 entre Mantes et les Andelys. La Saône descend de 4 cm par km entre Verdun et Saint-Bernard près de Trévoux, sur 132.500 km; puis de 25 cm par km sur les 35 derniers kilomètres du cours.

(23) Le Rio Yi, affluent méridional qui débouche sur le cours inférieur, a une surface réceptrice exactement égale à celle du Rio Negro avant le confluent avec le Tacuarembo. Ses crues doivent arriver en avance sensible sur celles qui descendent du bassin supérieur.

del Bonete. Les affluents symétriquement tracés de part et d'autre du Rio Negro entre la confluence majeure et Bonete, sont incomparablement plus courts que les collecteurs maîtres, et leurs crues atteignent celui-ci très en avance sur les flots d'amont lors des averses uniques. Donc ils ne peuvent renforcer notablement le maximum formé au confluent susdit (origine du Rio Negro moyen) que par polygénie, si une nouvelle précipitation les gonfle fortement, lorsqu'arrivent les plus gros débits, dus à une averse précédente, des rivières principales. De toutes façons lors des très grandes crues, les dits flots, dus essentiellement à une concordance monogénique doivent représenter les quatre cinquièmes sinon plus du maximum à Bonete.

B. *Terrains.* — Pour la nature du sol, certains éléments de l'hydrologie révèlent un caractère fondamental dans notre opinion et bien peu en rapport avec les lieux communs habituels sur la perméabilité ou l'imperméabilité, affirmés a priori d'après la nature et le nom des terrains. Car d'après maintes expériences maintenant acquises, les formations de même nature lithologique, les calcaires ou les granites, ou les basaltes, etc, peuvent avoir des effets hydrologiques extrêmement divers, selon les degrés de fissuration, de fracture et selon les granulations, la porosité, les épaisseurs des manteaux superficiels de décomposition.

Ici comme dans les territoires du Jacui et du Taquari, les réserves hydriques souterraines ne peuvent être ni amples ni profondes. On verra pourquoi nous concluons ainsi. Cependant l'infiltration dans les terrains superficiels poreux doit être assez abondante pour réduire notablement les crues à moins de forte saturation préalable. Mais en fait, la même remarque nous semble de plus en plus s'appliquer à quantité de bassins, réputés imperméables et qui le sont à certains égards.

Après cette constatation, peu importe d'avertir que le Sud-Est a pour substratum une grande masse cristalline; puis que les basaltes du Trias et du Lias règnent au Nord-Ouest. Car nous connaissons des basaltes (en certains secteurs des Monts des Cascades, aux Etats-Unis) dont les capitalisations en eau alimentent d'énormes étiages. D'autres basaltes (et cela paraît être ici le cas) ne se prêtent point à des accumulations souterraines de grand style. Dans toute la partie centrale, la plus étendue, figurent les roches sédimentaires de la série de Gondwana. Il s'agit de formations variées, mais presque toutes rebelles, nous ne craignons point de l'annoncer, à la rétention volumineuse d'eaux infiltrées.

2. **Traits principaux du régime général.** — A. *Abondance moyenne et bilans de l'écoulement.* — On a une bonne information sur le régime du Rio Negro, grâce aux observations hydrométriques faites depuis 1908, à Paso de los Toros, poste situé à 22 km en aval de Rincon del Bonete, soit à 372 km de l'embouchure. Ici le module ou débit moyen annuel de 39 ans (1908-46) avait atteint 525 m³, d'où l'on a déduit 515 m³ pour 39 200 km² à Bonete, soit 13,15 l/s/km². Abondance spécifique presque double de celle de la Seine à Paris (6,60) un peu inférieure à celle de la Saône à Lyon (14,50). Grâce à une alimentation copieuse en eau atmosphérique (1 150 mm) contre 975 pour la Saône et 710 pour la Seine avant Paris, le module serait encore plus riche si la température moyenne annuelle n'égalait point 16 à 17° contre un peu moins de 11 pour la Seine. En raison de cette tièdeur, le déficit annuel d'écoulement D, ou différence entre la pluie tombée P et la pluie écoulée P', atteint 736 mm contre environ 500 pour la Seine et 520 pour la Saône. Valeur d'ailleurs normale pour la température et les chutes d'eau en question.

Le déficit est au contraire égal ou supérieur aux chiffres attendus pour le Taquari à Mussum (1 072 mm) et encore gros (1 003 mm) pour le Jacui à Cachoeira. En franche certitude, la supériorité de 2 à 3° que représentent les températures dans le bassin du Guaiba est loin de pouvoir justifier toute cette différence. Et si les chiffres sont exacts il faudrait trouver une bonne explication. Notre étude essentiellement vouée aux crues extraordinaires ne peut aborder cette recherche (24).

Et de même nous nous contenterons de signaler, mais avec étonnement et force, les écarts inouïs que paraissent éprouver les modules particuliers d'une seule année, à Paso de los Toros. Sur le bassin à l'amont les précipitations annuelles peuvent osciller de 700 à 1 900 mm, les quotients d'écoulement apparents de 7 à 60 %, les débits moyens de 59 m³ en 1917 et 59,5 m³ en 1946, à 1 520 en 1914 et 1 255 en 1941. Soit entre les moyennes extrêmes connues, un rapport de 25,8. Sur la Loire inférieure et sur la Seine à Paris, fleuve très irrégulier malgré sa réputation contraire bien établie, les rapports analogues ne paraissent pas dépasser 7,5 et 8 ou 9. On voit à quel point extravagant l'abondance moyenne du Rio Negro est fantasque (25). Nous même aurions jugé naguère de tels écarts

(24) Le quotient ou coefficient annuel d'écoulement ou rapport P'/P de la pluie écoulée à la pluie tombée vaut 36 % (30 % sur la Seine à Paris, 32 % pour la Loire, 41 % pour la Garonne, 55 à 60 % pour le Rhône). Ce quotient est plus élevé que ceux du Taquari à Mussum et du Jacui à Cachoeira, 35 % pour l'un et l'autre, bien que ces deux rivières bénéficient d'arrosages très supérieurs (1630 et 1510 mm) à celui dont profite le Rio Negro).

(25) Nous avons éprouvé la même stupéfaction en découvrant pour 12 mois, de 1948-49 sur l'Aveyron inférieur, un module qui n'atteint pas 7 % de la moyenne globale pour plusieurs dizaines d'années. Puis le Tarn et le Lot réunis durant la même année auraient été inférieurs d'au moins 80 % à la normale.

possibles seulement sur des rivières bien moins alimentées dans une longue période. Et notre perplexité s'accroît lorsque nous trouvons pour le même rapport sur le Jacui à Cachoeira, seulement 7,8 et sur le Taquari à Mussum, pas même 5, dans une période courte (1940-45), mais qui a comporté, semble-t-il des années respectivement très riches et très pauvres. L'avantage que détiennent les deux rivières brésiliennes pour leurs modules spécifiques globaux, 17,8 pour le Taquari, 17,05 pour le Jacui ne suffit incontestablement point à expliquer l'instabilité, bien moindre pour eux que pour le Rio Negro, de leur abondance moyenne annuelle (26).

B. *Variations saisonnières.* — Les variations saisonnières telles que nous les montrent les moyennes mensuelles des hauteurs et des débits, ne reflètent pas ou presque point les fluctuations moyennes pluviales. De même que dans les domaines du Jacui et du Taquari, ces dernières valeurs ne donnent un avantage net à aucune saison. Or, les débits moyens mensuels sont très différenciés, et les plus forts en saison froide, parce que l'évaporation est alors la plus faible. Les débits à Rincon del Benete d'après leurs moyennes journalières de 24 ans (1909-32) ont leurs minima de novembre à mars et surtout de janvier au milieu de mars, c'est-à-dire en plein été. Ils atteignent leurs plus grandes valeurs de la fin de mai au 10 octobre, avec l'apparence d'un maximum peu accentué à ces deux moments, c'est-à-dire au milieu de l'automne et au début du printemps. Le fait a sans doute pour cause l'intervention dans les moyennes (en 1909-32 tout au moins) de grosses averses génératrices de crues durant lesdites semaines. Mais entre ces deux bombements du diagramme, l'abondance moyenne diminue à peine. Ce sont des régimes pluviaux de genre tempéré, mais pas semblables aux types océaniques d'Europe. Car pour ceux-ci (Seine, Tamise, Loire inférieure, Moselle, etc.) les moyennes mensuelles sont en pleine décroissance dès le début du printemps et encore pas très élevées en novembre, équivalent à mai austral. Et le maximum unique moyen dure tout au plus de janvier au début de mars, alors que sur les rivières ici étudiées il s'étale en plateau, légèrement bosselé au début et à la fin, sur 5 mois.

C. *Irrégularité interannuelle et rôle des crues dans les moyennes mensuelles.* — En réalité comme dans tous les organismes des rivières

(26) D'après M. Rochefort on a pour le Taquari des moyennes mensuelles comprises entre 143 et 220 m³ de novembre à avril (saison chaude) et entre 330 et 168 m³ durant le semestre suivant. Maximum en septembre-octobre donc au début du printemps. Il en est à peu près de même sur le Jacui quoique ce dernier soit moins fort en septembre que de mai à août. Mais ces chiffres ne valent que pour 16 ans (1940-55). Et pour 30 ou 40 années les classements des moyennes mensuelles différeraient peut-être sensiblement dans le détail de ceux que nous venons d'indiquer sommairement.

pluviales non soumises à des contrastes décisifs et jamais ou presque jamais manquants, entre surabondance des chutes d'eau en certaines saisons et pénurie chaque année en d'autres mois eux aussi toujours les mêmes, le Jacui, le Rio Negro et leurs voisins se comportent très capricieusement d'une année à l'autre. De nombreuses crues, les plus fréquentes et les plus fortes dans l'ensemble en saison froide et surtout à la fin du printemps et au début de l'automne mais point impossibles en été, causent la prédominance des moyennes générales aux mois que nous avons dits. En 1914 elles se sont suivies avec peu d'interruption sur le Rio Negro, de la fin de mars à décembre (terme du printemps), et c'est alors que survint le maximum le plus élevé. En 1916 et 1917 il n'y eut que des basses eaux, sauf quelques poussées infimes qui n'atteignirent même pas 1 000 m³. En 1923, les crues véritables ne commencèrent qu'en août et le niveau le plus haut se plaça encore en décembre. En 1912 il y eut par hasard une assez forte crue de janvier. C'est dans les détails pour chaque année le règne de la fantaisie.

D. *Les étiages.* — Nous avons vu que les étiages graves, bien moins désordonnés pour leurs dates saisonnières, ont lieu seulement en pleine saison chaude. La misère des modules en certaines années suffit à faire pressentir que ces pénuries peuvent réduire le débit à des chiffres lamentables. De fait on nous indique pour le minimum connu en 39 ans à Bonete, 10 m³, provenant de 39 200 km², soit 0,257 l/s/km², chiffre mesquin et pourtant deux fois plus avantageux que le minimum absolu du Taquari à Mussum (27), mais à peine dépassé par le débit le plus petit connu du Jacui (0,30). Cette pauvreté en étiage, pour des rivières alimentées par des précipitations plus qu'honorables, est le principal indice qui nous fait conclure à la prépondérance excessive de l'imperméabilité dans l'ensemble desdits bassins; et en tout cas au manque ou à l'insignifiance des infiltrations en profondeur jusqu'à des nappes sur lesquelles s'accumuleraient d'opulentes réserves hydriques. Ces eaux, débitées ensuite lentement par maintes sources abondantes et intarissables empêcheraient toute pénurie aussi piteuse à beaucoup près que celles dont nous venons d'indiquer les chiffres.

3. **Le barrage de Rincon del Bonete.** — A. *Caractéristiques principales.* — La pente du Rio Negro ne permet point l'aménagement de hautes chutes pour la production de l'énergie. Mais la conforma-

(27) Pour l'Uruguay à Concordia (plus de 200 000 km²) le record d'indigence, à savoir 1 l/s/km² était déjà pauvre avant 1945, année où le fleuve éprouva un étiage encore plus chétif.

tion de la vallée dans le cours moyen et la faiblesse de sa population permettaient la création de réservoirs artificiels particulièrement vastes et volumineux, donc susceptibles de neutraliser le fléau des pénuries excessives en débits, à moins de sécheresses exceptionnellement prolongées (comme celle qui dura d'octobre 1915 à février 1918). En outre, à Rincon del Bonete on a reconnu l'existence d'une masse basaltique épaisse de 160 m en 8 couches superposées, et sur laquelle on pouvait fonder un barrage, avec certitude de fuites relativement minimes (2,4 à 3 m^3/s initialement). Les travaux commencés en 1934, ont été pratiquement finis en 1942, mais à cause de la guerre mondiale la fourniture du matériel mécanique et électrique n'a pu être terminée qu'à la fin de 1945, date de la mise en service. La longueur mesure au total 1 077,50 m sans compter deux petits barrages en terre établis à droite au-delà de l'ouvrage principal et destinés à obstruer deux dépressions peu accentuées, mais par lesquelles l'eau pourrait rejoindre la rivière à l'aval. Ces constructions ont, sur 1,70 et 3,90 de hauteur, 270 à 390 m de longueur.

On a établi l'ouvrage à l'origine septentrionale d'un méandre très accentué et développé avec un axe de 5 ou 6 km vers le Sud. Le barrage proprement dit s'élève à 40,80 m sur la partie la plus basse de la fondation, et à 35 m sur le lit. Il comprend pour l'évacuation des crues, 12 vannes verticales larges de 10,50 m et hautes de 5 m, avec seuils à la cote de 76 m.

La longueur du lac ou plutôt celle du cours fluvial noyé à l'amont atteint pour le niveau normal de 80 m environ 186 km pour une superficie de 1 050 km^2, presque autant que pour les surfaces totalisées des lacs de Genève et de Constance (578 et 538 km^2). Et le volume emmagasiné totalise près de 9 milliards de m^3. A la cote de 83 m la superficie représente 1 340 km^2 et le volume liquide 12,5 milliards de m^3, contre 16,55 correspondant au module annuel de 39 ans. On ne prévoyait pas que les crues pourraient produire un niveau plus élevé.

A celui de 84,30 m les eaux du réservoir commencent à se déverser sur 900 m de longueur.

Le débit utilisable de 640 m^3 peut pour une puissance installée de 122 000 kW en 4 turbines verticales Kaplan, avec une chute moyenne de 23,6 m, produire 660 millions de kWh en année moyenne.

A 88 km en aval, à Baygorria un nouvel équipement, entrepris en 1956 et mis en service en 1960 ou en 1961, crée un lac de 96 km^2 au niveau normal de 54 m, avec une réserve de 500 millions de m^3. On peut utiliser 730 m^3 en 3 turbines Kaplan, de 35 000 kW chacune sous une chute de 16,20 m.

B. *Plus grande crue escomptée.* — Comme toujours lorsqu'on dresse les plans d'un barrage, on a voulu supputer les plus grandes crues dont il fallait assurer l'évacuation à l'aval, compte tenu de l'atténuation due à l'emmagasinement dans le réservoir. On avait remarqué que les montées pouvaient s'effectuer avec une grande vitesse (28) malgré la modération des pentes. D'autre part en 39 ans on avait noté d'après les observations faites à Paso de los Toros (fig. 7), 5 crues dont les maxima avaient dû présenter 5 000 m³ ou plus à Rincon del Bonete. Le record connu était évalué à 5 500 m³. La fréquence de ces pointes comprises entre 5 000 et 5 500 m³ rendait très évidente, même pour un chercheur peu familiarisé avec les méthodes de la haute statistique, la banalité relative de ces phénomènes. Et il tombait sous le sens qu'il fallait prévoir des maxima éventuels beaucoup plus redoutables. On a donc admis à la suite de calculs dont nous ignorons les voies et moyens, 9 000 m³ comme très grande crue à craindre (29), de probabilité 0,01 (donc une fois en moyenne tous les cent ans) selon un auteur, et de probabilité 0,001 (crue millénaire) selon un autre texte. De telles hautes eaux devaient porter la cote du lac à 83 m et ne donner lieu qu'à un déversement de 5 000 m³ facilement opéré grâce aux 12 vannes (30).

Nous rappelons que pour 29 900 km², la crue record de la Saône à Lyon (celle de novembre 1840) n'a pas dépassé 4 000 à 4 300 m³, soit 134 à 144 l/s/km², avec des valeurs de 23 à 25 pour A. Or, c'était un phénomène d'intervalle moyen très grand, peut-être 500 ans. 9 000 m³ provenant de 39 200 km² à Rincon del Bonete impliquaient 45,4 pour A. Certes il était facile de s'apercevoir que le temps de concentration, c'est-à-dire de ruissellement grave depuis la source jusqu'à Bonete était beaucoup plus bref (environ 5 jours) que pour la Saône depuis son origine et celle du Doubs jusqu'à Lyon (9 jours). Célérité relative causée pour le Rio Negro par l'encaissement entre des hautes berges point ou peu submersibles, lors des crues point exceptionnelles et par le dessin plus dangereusement proportionné et agencé pour ce réseau que pour celui de la Saône. Peut-être l'origine météorologiquement polygénique de maintes crues, et donc les durées assez longues de leurs croissances dûes à plusieurs épisodes élémentaires rapprochés dans le temps, et plus ou moins

(28) Certaines études mentionnent pour Bonete des maxima de 18 m, et des croissances de 7 m en 9 heures, donc des violences dignes de celles du Taquari. Etant donnée la médiocrité du relief et des pentes fluviales ces chiffres s'ils sont exacts nous semblent très remarquables.

(29) On a dû découvrir seulement après la grande inondation ici étudiée, qu'en 1888, le débit à la suite d'une montée de 17 à 18 jours avait dépassé 8 000 m³.

(30) Il semble qu'en réalité pour un niveau de 83 m les vannes en 1959 n'ont pu déverser que 4 500 m³

superposés sur le collecteur principal, ont-elles trompé. Elles auraient en partie masqué les rapidités possibles des évolutions et par conséquent les grandeurs à redouter pour les débits de pointe à Bonete. Cependant, nous-même, malgré un certain pessimisme envers les phénomènes naturels à craindre, n'aurions sans doute point prévu

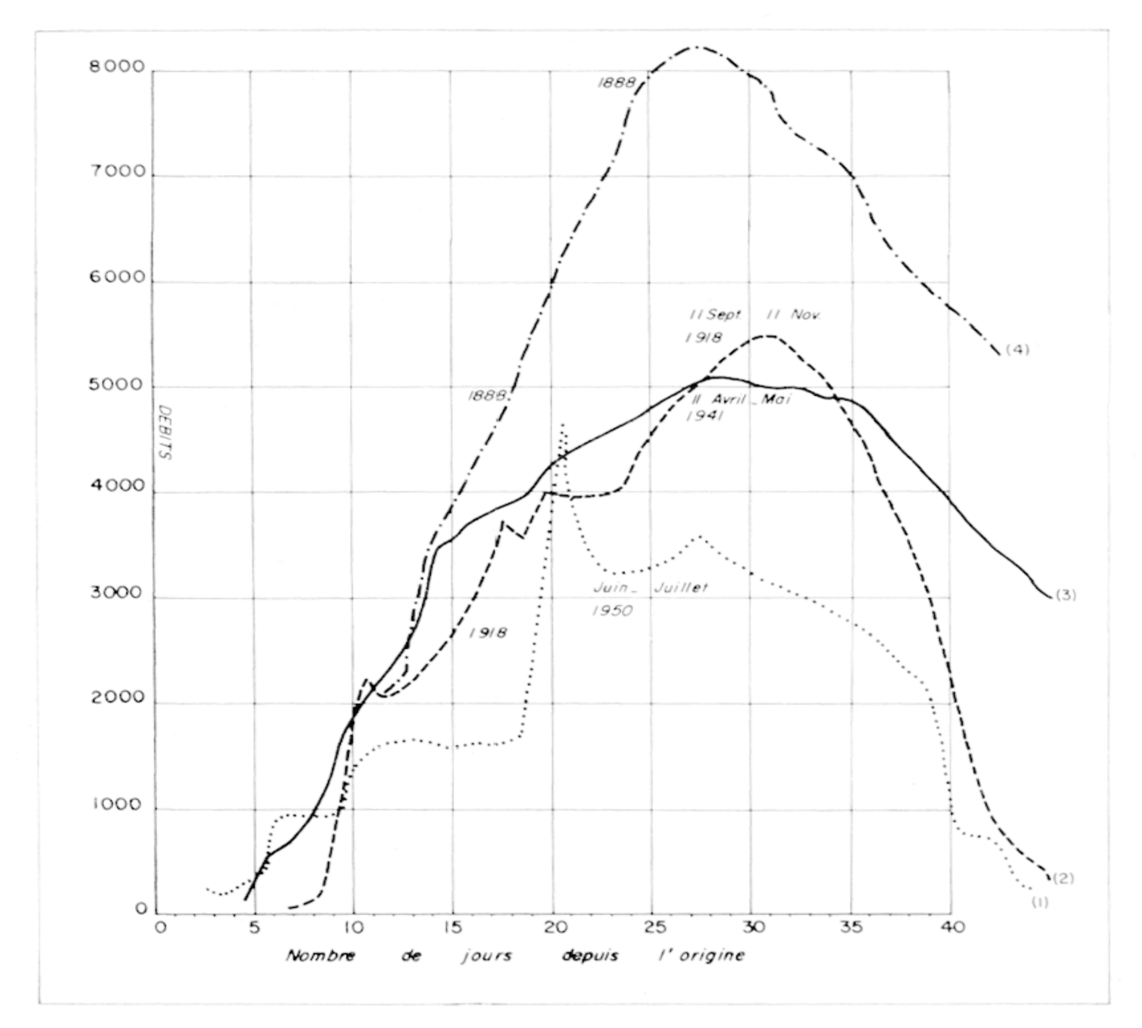


Fig. 7

Fortes crues antérieures du Rio Negro à Paso de los Toros.

(D'après l'Ingenieria civil de Obras hidroelectricas.)

d'après les bases hydrométriques disponibles plus de 10 000 ou peut-être de 12 000 m³ pour une crue tout à fait extravagante (millénaire par exemple) à craindre.

4. **Les hautes eaux d'avril 1959.** — A. *Débit maximum à Rincon del Bonete.* — Or, dans la deuxième quinzaine d'avril 1959, ces

chiffres furent presque ridiculisés lors de crues désastreuses qui affligèrent le Rio Grande do Sul, puis l'Argentine au-delà du fleuve Uruguay, le Parana inférieur selon les nouvelles de presse, et la République de l'Uruguay. Nous ignorons encore si dans le bassin du Guaiba les crues ont été comparables à celles de 1941. La chose nous semble douteuse. Mais le fleuve Uruguay lui-même a subi un gonflement exceptionnel. Et à la station principale de son cours inférieur, soit à Federacion (31), il aurait nettement excédé le record déjà très imposant de mai 1941, avec 35 000 m^3 contre 30 000 pour 227 000 km^2, soit 154 $l/s/km^2$ et 73,5 pour A.

C'est tout ce que nous pouvons dire sur le fleuve international en question. Mais nous avons pu obtenir sur la crue du Rio Negro à Rincon del Bonete, la documentation abondante que nous avons précisée plus haut dans une note.

Nous avons de la sorte appris que la rivière a débité, le 20 avril, 15 420 m^3, soit à l'issue de 39 200 km^2, 393 $l/s/km^2$ avec 77,8 pour le coefficient A. Pour un bassin pas plus accidenté de telles valeurs doivent être extrêmement rares dans le monde. Et les chiffres plus forts que nous pourrions citer pour l'Inde s'expliquent en partie par des pentes plus vives (32) que sur le Rio Negro. Il en est de même pour la crue monstrueuse de la Miami River, affluent septentrional de l'Ohio en mars 1913, à peu près 10 000 m^3 pour 10 000 km^2, avec A égal à 100. Au reste le domaine de la Miami n'est pas plus élevé que celui du Rio Negro, mais grâce à bien plus de brièveté dans le cours, la pente de cette rivière est 2 ou 3 fois égale à celle du Rio Negro. Car elle fait plus de 0,60 m par kilomètre sur les derniers 132 km. D'où la fougue de l'évolution, d'ailleurs monogénique, en mars 1913 (la croissance ne dura pas plus de 48 heures à Hamilton) et le renforcement corrélatif du plus gros débit. Le chiffre attribué à celui-ci a le mérite d'une très bonne approximation due à des recherches qui firent date.

Pour le record du Rio Negro à Rincon del Bonete, l'exactitude souvent médiocre en matière de débits est encore meilleure. En effet on a calculé fort bien de la façon suivante les apports de chaque jour. Tout d'abord on a mesuré les modifications de superficie produites en 24 heures par les variations du niveau dans le réservoir. A ce point de vue des relevés photogrammétriques effectués en avion lors du maximum atteint par le lac ont permis de rectifier les relations inexactes précédemment admises entre les niveaux d'une part,

(31) Renseignement fourni par M. Ludwig Meyer.

(32) Mais aussi par des pluies monogéniques plus puissantes.

et les surfaces et les volumes liquides retenus de l'autre. Corrections point insignifiantes puisque on s'est aperçu que pour l'apogée (85,01 m), la surface atteignait 1 520 km^2 au lieu de 1 750 retenus précédemment ; pour 83 m, 1 340 km^2 au lieu de 1 495 et pour 80 m, 1 050 km^2 et non 1 140. En conséquence on a pu éliminer les exagérations antérieures commises, au sujet des accroissements journaliers de volumes, et donc sur les débits à la seconde pendant 24 heures.

A ces débits il fallait ajouter ceux que l'on a évacués à partir du 11 avril par le déversoir. En ce genre de calculs, on risque de grosses erreurs. Mais on les a éliminées ou réduites très notablement en procédant (juin-juillet 1959) à des observations sur modèle réduit, à l'Université de Montévideo (Ingenieria et Agrimensura). Ces déversements ont atteint jusqu'à 6 840 m^3, contre 9 259 m^3 correspondant aux accroissements de volume (mais lesdits maxima respectifs n'ont pas eu lieu le même jour). On a supprimé tout apport aux turbines après le 19 avril. Enfin, on n'a guère pu se tromper sur les valeurs absolues en calculant les débits déversés au-dessus du barrage (jusqu'à 858 m^3).

B. *Evolution de la crue*. — Au 25 mars le niveau du lac ne dépassait pas 78,20 m. Une première poussée anormalement brève, donc due à des pluies dont l'aire ne s'étendait sans doute pas loin vers les sources, produisit le 28 un maximum de l'ordre de 3 000 m^3. Les apports au lac diminuèrent vite pour croître de nouveau et atteindre 3 530 m^3 le 7. La principale série pluvieuse avait commencé la veille : 82 mm en 2 jours officiels. L'arrosage s'intensifia du 8 au 9 et il donna en un jour officiel (33) 65,4 mm sur l'ensemble du bassin. Le ruissellement bénéficia de la saturation précédente et en 4 jours le débit après avoir baissé légèrement deux fois du 8 au 10 dépassa de loin toutes les crues connues pour atteindre 10 607 m^3 le 15. Le niveau du lac à 7 heures ce jour-là fut de 81,45 m. Cependant les précipitations n'avaient manqué en aucun jour du 9 à midi jusqu'au 14 à la même heure. Et elles avaient fourni au total 25,5 mm selon l'observation du 10, et 104 du 11 au 14. Ce fut plus que suffisant pour permettre au flot d'atteindre le premier maximum record indiqué plus haut, puis pour décroître seulement de 800 m^3 jusqu'au soir du 16. Mais à ce moment commencèrent les pluies décisives, à savoir 70 mm de midi le 14, à la même heure le 15, et 94,7 mm

(33) Nous appelons jour officiel les 24 heures comprises entre deux observations pluviométriques régulières. Les précipitations attribuées ensuite sur les registres au jour du relevé ou à la veille peuvent s'être réparties de manières très différentes au cours du temps total en question. Et une pluie signalée pour 2 jours officiels consécutifs est par exemple tombée pendant 48 heures sans discontinuer, ou bien en 2 ou 3 averses distinctes et séparées par des intervalles de 10, 15, 25 heures, etc.

durant les 24 heures suivantes. Et ces précipitations s'abattirent sur un bassin encore ruisselant ou imbibé jusqu'à refus (fig. 8). La crue reprit et dépassa de loin tout ce qu'on aurait pu prévoir. Son maximum donna dans la journée du 20 en moyenne 15 420 m³ à l'entrée dans le réservoir. Il avait pour éléments 9 259 m³ correspondant à l'accroissement de volume subi par le lac, 5 820 m³ déversés et 341 m³ évacués par des brèches infligées grâce à des explosions aux petits barrages en terre de la rive droite. Si aucune erreur de calcul n'a faussé les chiffres, il y aurait eu deux pointes pour les débits arrivant au lac : 14 200 m³ le 18 et 15 420 le 20 après une réduction

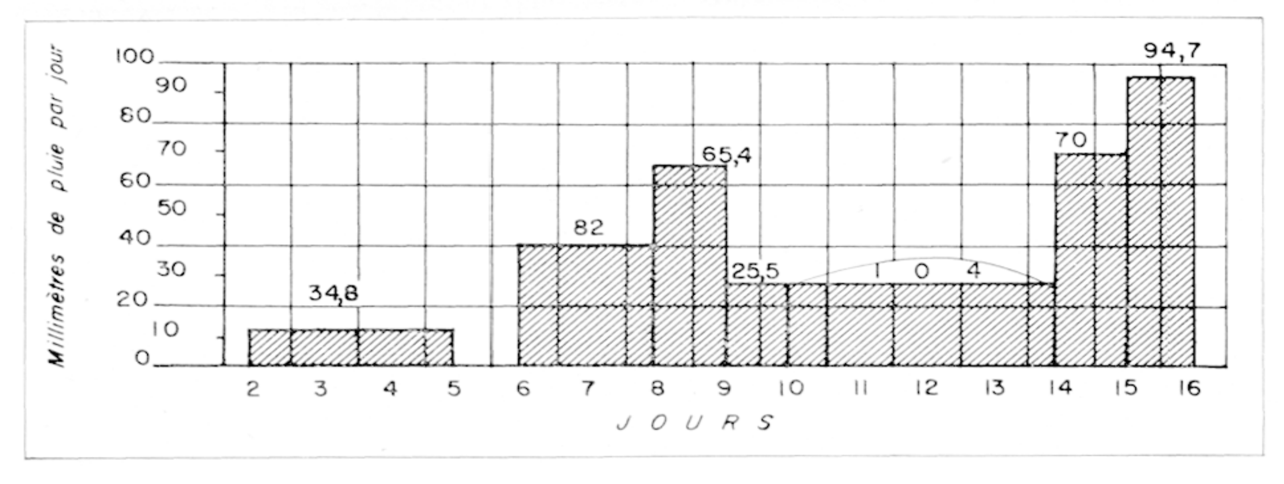


FIG. 8

Pluies moyennes en millimètres du 2 au 16 avril 1959 sur le bassin du Rio Negro à l'amont de Rincon del Bonete (de midi à midi).

(D'après l'Ingenieria civil de Obras hidroelectricas). Par exemple : 94 mm sont tombés du 15 à midi au 16 à la même heure; 104 du 10 à midi au 14 à la même heure (26 mm par jour en moyenne).

de 1 100 m³ le 19. Nous avouons considérer comme remarquable un tel avatar dans l'évolution, à l'issue d'un bassin pas plus accidenté; même si les pluies du 14 et du 16 au lieu d'être continues se sont réparties (ce que nous ignorons) en deux grosses averses très nettement séparées.

Ensuite les débits diminuèrent sans à-coup jusqu'au 24. A ce moment se manifestèrent les effets d'une nouvelle pluie modérément intense à savoir 48,4 mm en deux jours officiels du 21 au 23. La recrudescence ne dura qu'un jour, pour porter le débit de 4 063 le 25 à 4 751 le 26. Cependant au cours des 3 journées qui suivirent le maximum de la crue naturelle, l'afflux au lac avait dépassé les évacuations. Celles-ci avaient commencé par les vannes le 11, et par déversement au-dessus du barrage sur 900 m de longueur le 21 à

17 heures, moment où fut surmonté le couronnement de l'ouvrage, à savoir 84,30 m. Elles atteignirent le 22, 8 371 m³, dont 6 720 par les vannes et 694 par dessus le barrage ; puis le 23, 8 860 m³ dont 6 840 par les vannes et 858 au-dessus du barrage. Le même jour, à 10 heures, le niveau hydrométrique parvint à son apogée avec 85,01 m (fig. 9). L'apport total au lac était réduit déjà de presque moitié. Il ne dépassait plus alors 8 304 m³. Et le déversement par-dessus la crête du barrage cessa dans la journée du 17.

Nous ne nous étendrons pas sur les dramatiques événements qui se déroulèrent durant ces journées, ni sur les angoisses que l'on ressentit pour la sécurité du barrage dont la destruction aurait pré-

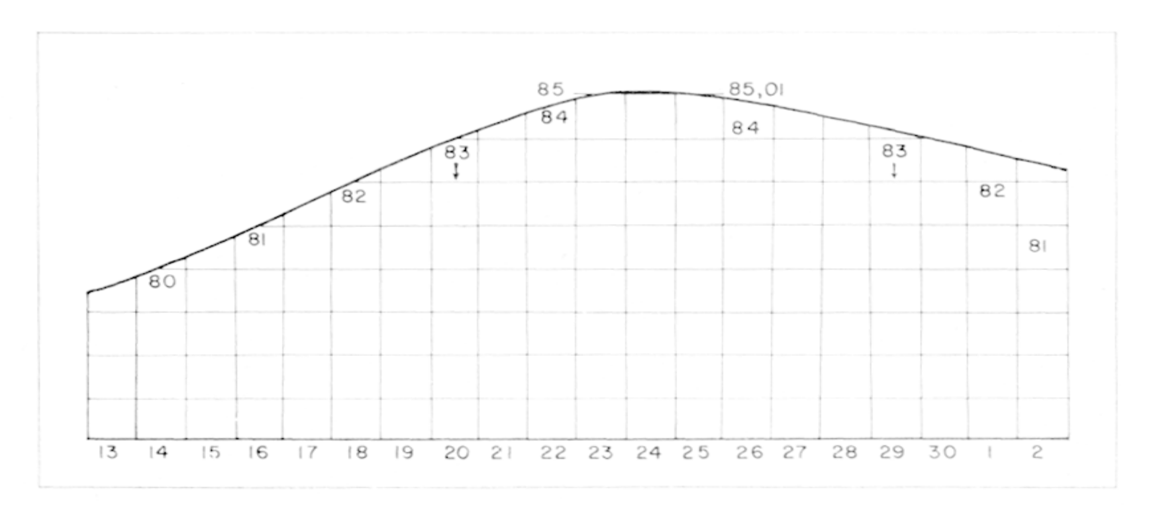


FIG. 9

Variations du niveau dans le réservoir à Rincon del Bonete du 13 avril au 2 mai 1959.

(D'après l'Ingenieria civil de Obras hidroelectricas.)

cipité plus de 15 milliards de m³ vers l'aval. Dès le 13 avril, le chantier du barrage et de l'usine de Baygorria fut recouvert par les eaux. Le 17 avril le danger de rupture pour le barrage de Bonete parut si grand d'après les informations sur les chutes pluviales, que l'on ordonna l'évacuation complète de Paso de los Toros par ses 12 000 habitants. Le 20 avril la centrale fut atteinte par les eaux et son fonctionnement fut totalement interrompu le 21. Lors du maximum du déversement il y eut 6 m d'eau dans la salle des machines.

C. *Caractère général du mécanisme et de l'évolution.* — L'examen de l'évolution, en conséquence de pluies dont nous voudrions connaître les horaires exacts sur les diverses parties du bassin nous

inspire une conclusion essentielle. D'ailleurs nous la sous-entendions dans certaines de nos remarques précédentes. Et nous la croyons très logique d'après les configurations du réseau, les rapidités de propagation et la gravité des concordances à l'amont du vaste réservoir. La crue d'avril 1959, sur le Rio Negro à Bonete, comme ses devancières les plus notables, a bien été polygénique *pour ses causes plu-*

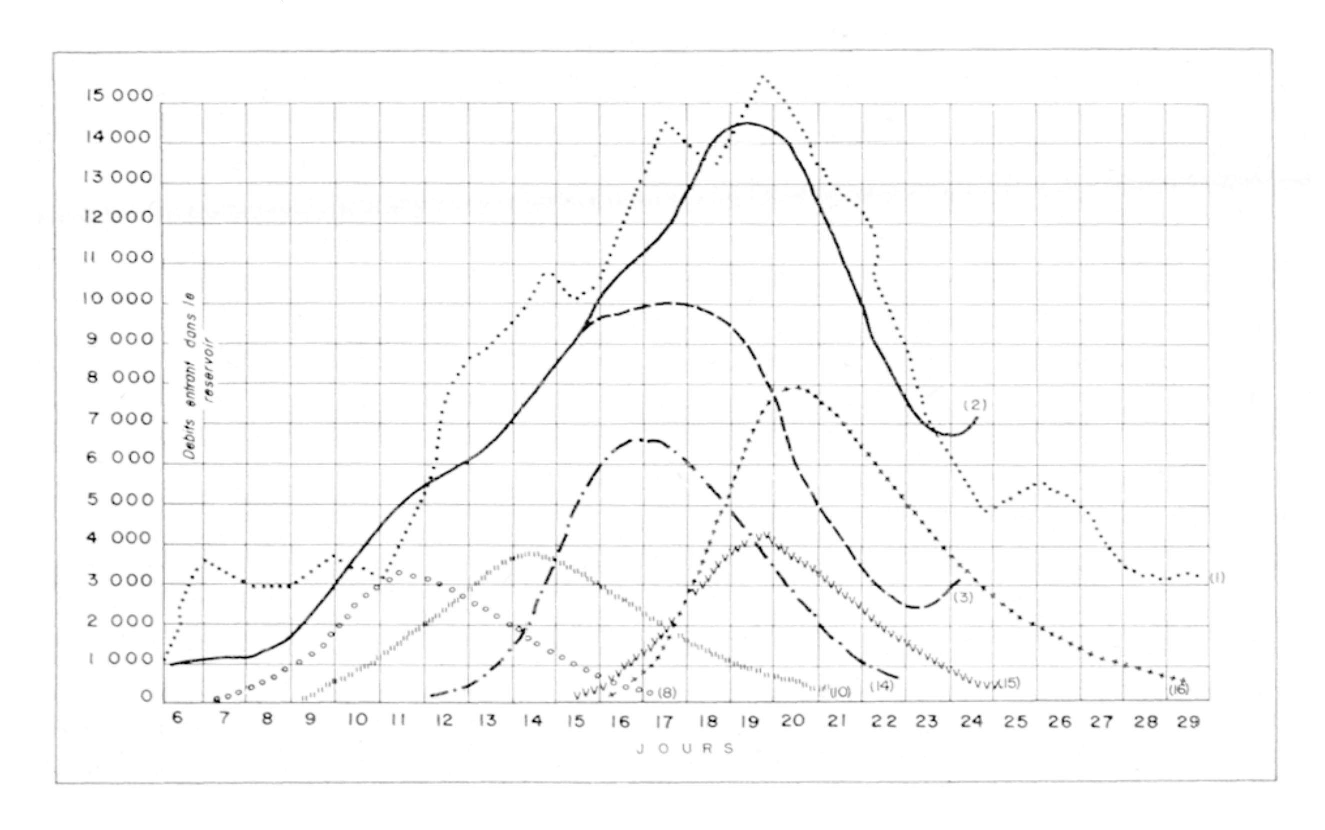


Fig. 10

Hydrogramme réel (courbe 1) de la crue d'avril 1959 pour les débits entrant dans le réservoir de Rincon del Bonete.

Le diagramme fictif n° 2 a été construit par calcul après coup, par superposition de 5 hydrogrammes successifs représentant les ruissellements évalués pour autant de phases pluvieuses successives entre le 7 et le 16 :

Le diagramme *8* résulte de la pluie mesurée le 7 et le 8; le diagramme *10*, le 9 et le 10; le diagramme *14*, le 11 et le 14; le diagramme *15*, le 15; le diagramme *16*, le 16.

Le diagramme 3 représente l'intumescence qui aurait eu lieu, si la dernière pluie, celle du 16, ne s'était point produite.

viales, à savoir la succession rapprochée de 4 ou 5 averses. Mais elle n'a eu presque en rien ce caractère, pour son *mécanisme hydrologique*. La polygénie pour ce dernier aurait voulu des combinaisons entre les maxima respectifs d'un certain ordre dans le temps pour une rivière principale, et les flots élémentaires engendrés par des phases pluviales antérieures sur l'autre artère maîtresse. Il n'en fut

rien et les autres séries pluvieuses qui gonflent le Rio Negro ne peuvent pas plus que celle d'avril 1959 produire des interférences polygéniques, à l'amont du réservoir, puisque la constitution du système hydrographique s'y oppose.

Le fait d'une succession de maxima très rapprochés mais tous monogéniques sur la rivière principale, se trouve démontré avec éclat si réellement, comme il semble d'après les bonnes garanties offertes par les calculs des débits de chaque jour, l'hydrogramme des apports au réservoir ne nous abuse point en indiquant 5 pointes, pas très saillantes bien sûr, mais extrêmement nettes : le 7, le 10, le 15, les 17-18 et 19-20.

D'autre part les brèves durées des intervalles entre chaque épisode pluvieux et chaque maximum consécutif de la rivière, confirment nos assertions précédentes sur la rapidité des translations. Et notamment, si les 70 et 94,7 mm comptés entre le 14 à midi et le 16 à la même heure doivent se décomposer en deux averses nettement séparées, les pointes secondaires résultantes ont été produites respectivement 3 et 4 jours après les fins de ces chutes d'eau. On pourrait d'ailleurs conclure de ces faits que les plus fortes intumescences sont les plus véloces. Et cela prouverait l'absence ou l'insignifiance de leurs débordements si l'on ne devait prendre garde à un fait perturbateur : l'existence du réservoir.

Il semble de plus en plus généralement admis qu'un flot donné, et spécialement un maximum, se propage beaucoup plus vite sur un volume liquide précédemment horizontal qu'il ne le ferait dans la vallée si celle-ci n'était pas noyée sous l'accumulation lacustre. Ici sur quelques 180 km de parcours, la translation exigerait au moins trente heures, ou un jour et demi. Il se peut que sur le lac, elle soit presque immédiate ou réduite à très peu d'heures par l'effet de phénomènes hydrostatiques. S'il en est ainsi, comme nous le jugeons probable, la propagation-type devrait durer dans la vallée point devenue lacustre du Rio Negro, 4,5 à 5 jours, et non 3 ou 4 jours, temps constaté semble-t-il en avril 1959. Or, la croissance est réglée par la propagation à l'amont. Le chiffre de 5 jours admis pour sa durée type dans les hydrogrammes unitaires des ingénieurs uruguayens, correspondrait bien aux conditions naturelles qui existaient avant la création du réservoir. Mais celle-ci aurait accéléré la translation et donc l'évolution.

Les mêmes techniciens ont construit rétrospectivement et théoriquement les 4 diagrammes qu'auraient pu produire en avril 1959 les ruissellements des 4 principales averses considérées à part. Ils les ont superposés avec les décalages nécessaires dans le temps pour chacun de manière à obtenir l'hydrogramme conbiné de toute la crue. Ce

tracé diffère vraiment peu du dessin résultant de l'expérience (fig. 10). Cependant il présente des variations continues, dans le même sens, pendant toute la hausse. Des apophyses secondaires comme celles que l'on a signalées (34) plus haut pour le graphique réel ne l'accidentent point. Le diagramme indique en son point culminant 14 300 m³, alors que le maximum effectif atteignit 15 420 m³. Et d'après cette étude, le flot n'aurait point excédé 9 800 m³ le 17 si l'averse des 15-16, la plus puissante par malchance, n'avait point eu lieu. Elle a donc suffi à renforcer le cataclysme de 55 %. Son effet eût été moindre si la propagation du flot consécutif avait exigé 5 jours.

S'il n'y a point eu polygénie dans les combinaisons entre flots élémentaires, la brièveté des intervalles entre chaque phase pluvieuse a tout de même grandement accru le maximum à Bonete. Car chaque nouvelle intumescence élémentaire a comporté grâce à la saturation précédente un quotient d'écoulement plus élevé que celui des phases antérieures. Puis chaque nouveau maximum élémentaire s'est superposé à des débits décroissants mais de plus en plus puissants d'un épisode à l'autre, et qui provenaient de la phase précédente. D'après les dessins de MM. M. Salles et A. Val, la moitié du maximum suprême le 20 correspondait aux eaux décroissantes de l'intumescence combinée due aux pluies antérieures à l'averse finale.

D. *Pluies responsables.* — Pour le détail par jour et par station, sur les divers bassins élémentaires des pluies responsables, nous ne savons rien ou pas grand chose. Mais, comme on l'a vu, nous possédons les lames d'eau moyennes pour chaque épisode ayant duré un à quelques jours officiels. Ces chiffres calculés par les ingénieurs uruguayens sont révélateurs dans une large mesure, malgré leurs imprécisions relatives. Leur somme générale de 605,8 mm en 29 jours, du 25 mars au 23 avril, est déjà une caractéristique saisissante et tout à fait impensable pour l'Europe, sur une pareille superficie contiguë. Ce total n'est guère inférieur à la précipitation moyenne reçue en un temps assez analogue dans le domaine semi-montagneux du Guaiba. Aussi dignes d'attention sont les maxima supérieurs à 1 000 et à 1 200 mm au Nord-Ouest sur les collines étirées du Nord-Est au Sud-Ouest qui séparent le domaine fluvial ici en question de celui de l'Uruguay. Dans le Sud-Ouest, sur le Rio Negro supérieur, bien moins arrosé que le Tacuarembo, et sur le réservoir et son bassin direct d'alimentation, les tranches pluviales ont été généralement

(34) Les mêmes pluies tombant sur le Jacui auraient certainement causé à Rio Pardo, pour un bassin analogue par son étendue à celui du Rio Negro à Bonete, une montée continue, sans aspérités secondaires du diagramme.

comprises entre 500 et 600 mm. Nous savons encore qu'en un jour, on a relevé 235 mm en une station, chiffre bien plus élevé que la plus forte pluie journalière observée dans le bassin du Guaiba en avril-mai 1941.

Mais le fait le plus saillant, le plus extraordinaire lors de ces intempéries a été le total recueilli sur toute la surface réceptrice en 10 jours, du 6 au 16 d'après les observations de midi soit 441,6 mm. Les comparaisons énoncées plus haut à propos des précipitations qui causèrent le cataclysme du Jacui suffisent à prouver l'extravagance d'un pareil arrosage en aussi peu de temps malgré l'absence d'un véritable relief condensateur. Il nous paraît improbable que 39 000 km² du Guaiba aient reçu plus en un même temps.

E. *Quotients d'écoulement.* — Nos informateurs uruguayens nous ont d'abord écrit que le quotient d'écoulement pour toute la période très pluvieuse, soit 29 jours, avait avoisiné 62 %. Ce chiffre évoquait pour nous les valeurs globales trouvées dans le système du Guaiba, à savoir donc 56 % pour le Taquari avant Mussum, 59 % pour le Guaporé, 62 % pour le Jacui supérieur à Bela Vista, 70 % de 780 mm en 35 jours pour le Jacui à Cachoeira.

Cependant nous avons jugé nécessaire de recalculer la valeur applicable au Rio Negro à Rincon del Bonete. Nous avons constaté que le volume liquide total pris en considération pour l'écoulement était compté à partir du 6 avril. Il n'était pour ainsi dire pas influencé par la pluie saturante de 81 mm en 4 jours tombée du 25 au 28 mars. Et 34,8 mm reçus du 2 au 5 n'avaient eu sur les débits observés à partir du 6 qu'un effet minime. Nous pensons l'avoir éliminé en comptant pour le débit de base à soustraire de l'écoulement total, en 26 jours, 600 m³ (débutant par 969 m³ le 6) ; soit en gros 1,3 milliard de m³ à déduire de 15,247 milliards. Il restait 13,947 milliards de m³, mais nous aurions dû évaluer le volume total pour quelques jours de plus. Retenons pour sa valeur nette en chiffres ronds 14 milliards de m³. Il en résulte un écoulement de 357 mm. La division par 490 mm tombés du 6 au 16 puis du 21 au 23 donne 0,73. Selon toutes probabilités pour la masse pluvieuse principale du 6 au 16 on trouverait 76 à 78 % ; et pour 165 mm précipités dans les deux derniers jours officiels sur un sol gorgé d'eau, quelque 85 %.

Cette dernière valeur est très grosse pour le milieu de l'automne en un pays sensiblement plus chaud que nos régions.

Le quotient d'ensemble rapporté à 10+2 jours de pluie, implique un déficit plutôt modéré d'environ 133 mm, en un mois, pour l'écoulement. Nous ignorons quelles furent les températures pendant ces semaines et nous ne pouvons dire avec précision dans

quelles mesures respectives cette perte assez grande a eu pour causes l'infiltration et l'évapotranspiration. L'évaporation elle-même est accrue par l'existence d'une grande surface liquide. Mais celle-ci n'occupe qu'un trentième de la surface réceptrice. Et même si l'évaporation y est 3 ou 4 fois plus active qu'aux dépens des terrains, cela ne majore que de peu, de 8 ou 10 mm, peut-être le déficit *général* compté pour tout le bassin lors de la grandiose intumescence. D'autre part, nous inclinons à penser que la saturation préalable était, non point excessive, mais supérieure à la normale au 6 avril, à cause des arrosages précédents. Ce facteur a dû réduire l'infiltration. Nous n'aurions aucune surprise si cette dernière cause de déficit n'avait point excédé en un mois, à partir du 6, 40 à 50 mm, contre 80 à 90 pour l'évaporation. Mais ces chiffres ne résultent que d'hypothèses grossières et peut-être absurdes.

Nous attachons un peu plus d'importance à la supposition que nous allons émettre relativement à la perméabilité du bassin. L'extrême médiocrité des étiages nous a déjà prouvé que les accumulations souterraines profondes sont très modiques. Le coefficient d'écoulement de la crue nous laisse l'impression que les terrains superficiels peuvent absorber avant imbibition des lames d'eau point négligeables quoique point comparables à quelques centaines de millimètres (35) qui peuvent disparaître dans les revêtements superficiels décomposés et peut-être dans les failles des montagnes cristallines en Californie du Sud et dans les cônes sous-jacents de déjections. Certes, à la fin des étés californiens régulièrement privés de pluie, le sol desséché pendant trois ou quatre mois possède dans ses vides un volume disponible énorme. Pourtant, même après des sécheresses exceptionnelles et prolongées, la capacité d'absorption pour le bassin du Rio Negro n'atteindrait sans doute pas à beaucoup près des chiffres égaux à ceux qui se révèlent dans les bassins fluviaux voisins de Los Angelès.

Dans le domaine du Jacui, les 440 à 480 derniers mm tombés en une dizaine ou une douzaine de jours en avril-mai 1940, ont dû s'écouler dans une proportion aussi élevée (70 à 75 %) que pour la masse pluviale décisive d'avril 1959 sur le Rio Negro. Et pour les ultimes épisodes d'avril-mai 1941 M. Rochefort indique 75 % à Bela Vista (valeur un peu faible), 85 % à Salto Grande, 75 % sur le Taquari à Mussum.

F. *Crues encore plus démesurées à craindre.* — La crue d'avril 1959 a causé des dommages très lourds et inspiré de vives angoisses pour

---

(35) Jusqu'à 600 et 700 mm en quelques mois à partir d'octobre; et 250 à 350 mm lors d'une seule grande crue causée par une averse de deux à trois jours. Ces pluies sont bien supérieures en leurs foyers de puissance maximale à celles que l'on relève en un ou deux jours par places dans le bassin du Rio Negro.

la sécurité du grand barrage qui est une des gloires de l'Uruguay. On fut très conscient de ce risque. Et la supériorité monumentale du maximum atteint, sur le plus fort débit de pointe escompté jusqu'alors, causa de légitimes alarmes. D'où la reprise des études hydrologiques sur lesquelles on avait basé les prévisions.

Et l'Office du Génie Civil des Travaux Hydroélectriques procéda aux recherches exhaustives, qui nous ont valu la documentation ci-dessus utilisée.

Tout d'abord on a établi la carte des isohyètes pour les pluies responsables. Et tout en conservant les tracés de celles-ci, on a placé en plusieurs positions successives une feuille transparente qui portait les courbes. Ainsi l'on a déterminé par tâtonnements quelles situations donneraient les moyennes pluviales les plus défavorables. Et l'on reconnut que la lame d'eau en amont de Bonete aurait été renforcée d'environ 10 %, si tout le système isohyétal avait été « ripé » de 65 kilomètres vers le Sud-Est.

Selon nous l'excédent consécutif de la crue résultante sur celle d'avril 1959 serait supérieur à 10 %, car pour une précipitation plus intense la part de l'écoulement serait elle-même plus forte. D'où la possibilité grâce à cette seule transposition réalisée dans la nature du maximum de 17 000 à 18 000 m^3 au lieu de 15 400. Et nous pensons à deux autres causes aggravantes : une pluie moyenne plus forte de 10 à 15 %, avant déplacement des isohyètes, que celle d'avril 1959 ; une saturation préalable bien plus complète. Moyennant cet état initial le quotient d'écoulement pour la pluie décisive de 10 jours eût dépassé 80 et peut-être 85 %. On se rend facilement compte que le concours sans doute point chimérique (36) de tous ces facteurs défavorables produirait un maximum voisin de 20 000 m^3.

Les ingénieurs uruguayens trouvent un même débit à craindre à à la suite d'évaluations différemment conçues. Ils ont relevé toutes les pluies recueillies dans le bassin à l'amont de Bonete entre 1912 et 1959. Ils ont pour le total des périodes d'observations, à savoir environ 1 500 années, catalogué les chutes les plus fortes en 24 heures. Ils en ont déduit par le calcul des probabilités qu'une pluie locale de 320 mm en un jour (37) devait être possible avec une probabilité de

(36) Notre doute principal à ce sujet est le suivant. Le maximum pluvial localisé en avril 1959 au Nord-Ouest et en partie dans le bassin de l'Uruguay, n'était-il point fortement orographique, c'est-à-dire commandé par le relief pas montagneux mais point non plus insignifiant qui forme frontière entre les deux domaines fluviaux? Dans ce cas le déplacement de 65 kilomètres vers le Sud-Est, c'est-à-dire vers des parties basses est-il justifiable? Nous ne pouvons en toute certitude émettre une réponse affirmative. Mais la proximité plus grande de l'Océan et l'éventualité guère douteuse de phénomènes atmosphériques frontaux assez peu gouvernés par les formes du terrain nous incitent à ne point juger irréalisable la transposition considérée.

(37) Le record connu est 292 mm (février 1953), puis viennent 244 mm (janvier 1941), 235 (avril 1959) et 17 autres chiffres supérieurs à 200 mm.

0,001 (une fois en 1 000 ans). Et ils ont admis qu'en fonction d'un pareil maximum local, la pluie moyenne sur le bassin serait de 230 mm.

Ils ont alors construit le diagramme de la crue qui résulterait d'une telle averse et comporterait une croissance de 5 jours d'après les conformations-types expérimentales des hydrogrammes unitaires à Benete, et en vertu du chiffre le plus élevé concevable pour le quotient d'écoulement, à savoir 90 %. Valeur sans doute point alarmiste au cas de saturation préalable excessive. La pointe d'un tel graphique représenterait 9 400 m³. Puis on a supposé que 72 heures plus tard, le même phénomène se renouvellerait sur le bassin. Et 3 jours après encore surviendrait une troisième poussée élémentaire, inférieure de 30 % à chacune des précédentes. L'hydrogramme combiné culminerait à 20 000 m³.

Ces dernières hypothèses, d'ailleurs contradictoires, rencontrent dans notre esprit deux objections. Tout d'abord une averse de 230 mm en un jour sur le bassin est-elle réalisable si le maximum paroxysmal est 320 mm ? Nous avouons ne pas en avoir la conviction. Le fait impliquerait un rapport de 0,72 entre la pluie moyenne sur 39 200 km² et le maximum central. Les auteurs ont estimé qu'un tel chiffre pouvait correspondre à la réalité, d'après les décroissances constatées par eux des lames d'eau pluviales à partir du foyer de chaque grande averse vers l'extérieur, dans des directions E-W, N-S et SW-NE. Mais si cette relation a été vérifiée dans des cas où le maximum pluvial ne dépassait pas 125 ou 150 millimètres en un jour, la décroissance vers la périphérie ne serait-elle pas presque fatalement bien plus accentuée à partir d'un maximum local plus que double ? Donc la grandeur de celui-ci serait-elle compatible avec la chute moyenne de 230 mm sur tout le bassin ?

D'ordinaire lorsque les pluies paroxysmales sont extrêmement fortes on note en contre-partie une réduction bien plus sensible de la précipitation moyenne en fonction de surfaces réceptrices croissantes, qu'au cas de chutes plus modérées au cœur de la zone atteinte.

En outre, presque toutes les pluies remarquables d'un jour citées par MM. M. Salles et A. Val ont eu lieu en plein été ou à l'extrême début de l'automne, de janvier à mars. D'où notre soupçon qu'elles avaient quelques chances d'être violemment orageuses et du même coup pas très extensives. Aussi bien ne connaît-on pas de très grandes crues du Rio Negro en cette saison.

Bref, nous doutons que des chutes pluviales moyennes aussi formi-

dables puissent se réaliser en un jour (38) sur ce grand bassin. D'autre part, nous avons eu l'idée de réévaluer le débit maximum qui aurait pour cause une pluie de 230 mm en 24 heures, s'écoulant dans la proportion de 90 %. Nous avons construit des hydrogrammes fictifs comportant une baisse beaucoup plus rapide que celle dont les ingénieurs uruguayens ont fait la prévision. Et notre dessin nous semble beaucoup plus conforme dans son tracé retombant à l'allure constatée pour la décroissance après le maximum en avril 1959. Le volume liquide total indiqué par 90 % d'écoulement voudrait alors bien plus que 9 400 m³ pour le maximum. Et en adoptant ce chiffre pour l'apogée de l'hydrogramme puis en défalquant un débit de base modéré, nous trouvons pour le quotient d'écoulement des chiffres approximatifs compris entre 0,50 et 0,60, selon les dessins plus ou moins pointus ou arrondis des graphiques vers leur sommet. Bref, des pluies inférieures à celles qu'admettent les ingénieurs uruguayens nous sembleraient pouvoir suffire à causer une première pointe de 9 400 m³, puis un maximum final de 20 000 m³. Cependant nous avons indiqué plus haut des éventualités météorologiques moins brutales pour chaque épisode mais pas invraisemblables et très dangereuses. Nous avons entrevu de la sorte comment un maximum de l'ordre de 20 000 m³ pouvait sans doute affluer jusqu'au lac de Rincon del Bonete. Aussi devons-nous approuver les plans que l'on a établis pour améliorer la capacité du réservoir. En 1959 on projetait de porter le couronnement du barrage à 86, 90 m au lieu de 84,30 m, et le niveau normal hydrométrique à 83 m au lieu de 80.

CONCLUSION

La crue d'avril 1959 sur le Rio Negro et l'Uruguay, comme celle d'avril-mai 1941 sur ce dernier fleuve et le Guaiba, comptent parmi les gonflements fluviaux les plus imposants que nous connaissions en dehors de l'Extrême-Orient pour des bassins de plusieurs dizaines de milliers de km² (même de 200 000 km² et plus pour l'Uruguay). Mais sur les méfaits de celui-ci nous ne connaissons encore que quelques chiffres de hauteurs et de débits maxima. Cependant pour des sur-

---

(38) Considérons les plus grandes crues indiennes qui détiennent dans l'ensemble les record du monde à l'issue de 20 000 à 100 000 km² et plus. Divers documents indiquent par exemple en 2 jours pour la crue centenaire de la Damodar (20 000 km²) 220 mm; et pour celle du Mahanadi à Hirakud (75 000 km²) 134 mm en un jour, 203 en 2 jours. Peut-être en septembre 1924 le haut Gange, la Djamna, etc ont-ils reçu quelque 250 à 300 mm en 48 heures sur 50 000 km². Ces données suggèrent la présomption que même en Extrême-Orient où le potentiel humide disponible pour les grandes averses extensives est immense, une seule pluie de 230 mm en un jour sur 39 000 km² doit être un événement tout à fait exceptionnel.

faces réceptrices de mêmes grandeurs, les rivières indiennes et sans doute celles d'Indochine et de Chine l'emportent nettement ou même de beaucoup en violence sur les cours d'eau subtropicaux de l'Amérique du Sud atlantique.

Puis pour des étendues inférieures à 10 000 km², les crues, en Asie des Moussons, et peut-être au Japon plus que partout ailleurs dans les mêmes contrées pour moins de 5 000 km², semblent incomparablement plus brutales que les intumescences possibles sur le Jacui, le Taquari, Le Rio Negro et leurs tributaires, sans égaler toutefois les démences fluviales dont peut souffrir le Texas. La gravité des crues au sud du Brésil et en Uruguay pour des bassins assez spacieux n'a donc point pour causes des averses localement terrifiantes, mais d'extension faible ou modérée (nous ignorons en tous cas de semblables phénomènes qui seraient servenus en ces pays). Elle tient à des chutes d'eau point médiocres certes en un ou deux jours aux lieux les plus arrosés, mais bien plus dangereuses par leur ampleur dans l'espace et dans le temps. Leurs sommes en 10,15 jours et plus sur des aires étendues, peuvent présenter effectivement le caractère très impressionnant qui manque à leurs paroxysmes.

Ces totaux funestes s'expliquent non par des durées fantastiques possibles pour chaque épisode pluvieux, mais par le nombre des averses abondantes qui se succèdent à peu d'intervalle. Caractéristique très propices aux crues polygéniques dues à des interférences entre poussées élémentaires déphasées à leur origine. Sur les collecteurs généraux ces combinaisons affectent des réseaux hydrographiques mal organisés (comme ceux du Guaiba et de l'Uruguay) pour des concordances graves monogéniques, à cause de disproportions entre les longueurs et les pentes individuelles des branches principales. Cependant la convergence et les longueurs respectives bien proportionnées du Tacuarembo, puis du Rio Negro rendent au contraire néfastement efficaces les superpositions monogéniques des débits élémentaires en amont du lac artificiel de Rincon del Bonete. Et d'autre part le rapprochement dans le temps des diverses phases pluvieuses en avril 1959 a fait que chaque onde nouvelle élémentaire une fois parvenue sur l'artère maîtresse à chevauché en partie l'onde précédente dont les débits n'avaient point eu encore le loisir de baisser profondément. Enfin, certains flots élémentaires venus du large bassin supérieur ont pu être renforcés en chemin dans une manière point négligeable, en vertu de polygénies partielles par les apports des petits affluents qui débouchent dans le lac. Cependant, la puissance du maximum en question était essentiellement due à l'efficacité de la monogénie.

Puis le trait le plus frappant qui se révèle dans la genèse de cette

crue est peut-être la rapidité relative de la propagation et des évolutions dans un réseau situé en plaine et très modérément déclive. La cause doit être un encaissement prononcé des lits, même au milieu de vallées alluviales et la médiocrité ou l'absence d'inondations sur les parcours jusqu'au réservoir de Bonete. Sur celui-ci d'ailleurs la vitesse de translation devient décuple peut-être par suite de phénomènes hydrostatiques propres aux nappes liquides profondes et normalement horizontales.